

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 5 (102)

Нижний Новгород 2013

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. № 5 (102). – 377 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора),
Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора), В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (отв. редактор), Т.П. Новикова (технич. редактор)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев,
В.В. Глебов, А.М. Грошев, А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, О.С. Кошелев, В.Ф. Кулепов,
А.А. Куркин, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов, В.П. Хранилов,
С.Н. Хрунков, Е.А. Чернышов, В.М. Галкин

УДК 050(06)
ББК 9я54

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2013

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

TRANSACTIONS
of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

№ 5 (102)

Nizhni Novgorod 2013

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. – Nizhni Novgorod, 2013. № 5 (102). – 377 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD:

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev.(Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina
(Executive Editor), T.V. Tretyakova (Executive Editor), T.P. Novikova (Technical Editor)
Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, V.V. Glebov,
A.M. Groshev, A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, O.S. Koshelev, V.F. Kulepov, A.A. Kurkin,
I.O. Leushin, M.G. Mikhalevko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,
Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

Electronic version of the journal:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Nizhni Novgorod State Technical University
n.a. R.Y. Alexeev, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	11
Букин П.Э., Фролова И.Н., Кутилова О.И. Автоматический выбор комплекта баз при полном базировании детали в станочное приспособление.....	11
Дементьев В.И., Кабалдин Ю.Г. Схема отношений субъектов трудовой деятельности в сфере услуг.....	18
Крайнов В.В., Тудакова Н.М., Фролова И.Н. Особенности применения электроплазменной обработки.....	25
Конищев Б.П., Конищев К.Б. Расчет теплофизических коэффициентов сталей по их химическому составу и температурной зависимости теплофизических свойств цветных металлов.....	31
Куликова Е.А., Гребнева Т.Н. Формализация проектирования маршрута обработки корпусных деталей на станках типа ОЦ.....	37
Крюков Л.Т. Определение момента перехода материала из пластического состояния в хрупкое с использованием параметров микропластической деформации.....	48
Панов А.Ю., Смирнов Д.А. Анализ инерционного воздействия на роторы силовых гироскопов.....	54
Иванов А.А. Расчет характеристик пьезодвигателя с продольной поляризацией.....	61
Кайнова В.Н., Демьянович Е.М. Роль термина «зависимый допуск», влияющего на снижение себестоимости и трудоемкости при изготовлении ответственных соединений.....	66
Манцеров С.А., Малинов И.В. Создание системы оперативного управления поставками с применением облачных технологий.....	73
Шестоперов В.Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости.....	79
Петровский А.Н. К задаче оптимизации параметров зацепления М.Л. Новикова.....	84
Тихонов В.М., Уткин Е.А. Процессы формирования поверхностей при обработке деталей машин резанием.....	95
Лаптев И.Л., Тихонов В.М. Технология и автоматизированная система приготовления и подачи водосмешиваемых СОЖ в металлообработке.....	102
Наумов В.Ф., Фролова И.Н. Глобальная система координат в металлообрабатывающей системе.....	108
Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием NVIDIA CUDA в программной среде LABVIEW.....	114
Кузьмишина А.М., Кретинин О.В., Власов Е.Е., Серый С.В. Исследование свойств бинарных интерметаллидов «из первых принципов» на основе квантово-механических расчетов с использованием CUDA.....	122
Крайнов В.В., Пономарёв М.В., Фролова И.Н. Анализ формата передачи данных STEP.....	129
Смирнов Д.А. Анализ кинематических характеристик кулисного механизма.....	135
Смоленский С.Ю., Павлов А.С. Рельефная сварка петель.....	142
Белявский Г.И., Зиновьев Ю.А., Кузнецов С.В. Литье с кристаллизацией под давлением заготовок армированных механически легированными гранулами.....	148

Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Кузнецов С.В., Швецов В.Д., Белявский Г.И. Создание базовой технологии получения низкосерийного и высокосерийного чугунов одной плавки.....	154
Белявский Г.И., Кузнецов С.В., Зиновьев Ю.А., Швецов В.Д. Литье с кристаллизацией под давлением биметаллических отливок.....	162
Гущин А.Н., Гусев Ю.Б., Созинов С.В. Поведение малоуглеродистой предварительно деформированной стали при статическом и циклическом нагружении.....	168
Хранилов В.П., Тесленко Е.В., Андреев В.В. Анализ динамической модели управления конструкторско-технологическим взаимодействием в САПР.....	177
Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и вейвлет-анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа.....	183
Серый С.В. Математическое моделирование наноструктур с заданными свойствами.....	190
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	197
Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности.....	197
Дмитриев С. М., Рязанов Р. Р., Соборнов А.Е., Котин А.В. Экспериментальное исследование нестационарного температурного состояния и характеристик термопульсаций фрагмента коллекторного узла теплообменника ЯЭУ.....	206
Безносов А.В., Ярмонов М.В., Новожилова О.О., Мелузов А.Г., Зудин А.Д., Черныш А.С. Теплогидравлические характеристики потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя при поперечном обтекании пучка труб применительно к РУ С ТЖМТ...	213
Новоселова Н.А., Рудоясова Л.Г. О постановке однородных краевых задач на уравнениях Максвелла.....	226
Данилов А.В., Радионов А.А. Расчет объемных акустических волн, распространяющихся в монокристалле ниобат лития (LiNbO ₃).....	233
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	239
Васильев А.А., Костин С.Ю., Сергиевский С.А., Степанов Е.В., Тумасов А.В. Моделирование условий криволинейного движения автопоезда в программном комплексе ADAMS/CAR.....	239
Анучин И.Е., Бутин Д.А., Беляков В.В., Гончаров К.О. Расчетно-экспериментальные исследования тягово-скоростных свойств гоночного болида формула-студент.....	246
Коникова Г.А., Серета П.В., Трусов Ю.П., Шашкина К.М. Расчетно-экспериментальное исследование свойств управляемости и устойчивости легкого коммерческого автомобиля.....	253
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	260
Косолапов Е.А., Солеников М.Д. Квазиодномерное приближение для расчета течений газа в каналах энергетических установок.....	260
Зуев В.А., Семенова Н.М., Кравченко В.А. Экспериментальные исследования ледового сопротивления ледокольной платформы на воздушной подушке в мелкобитых льдах.....	268

Антонов В.С., Грамузов Е.М., Зуев В.А., Ларин А.Г., Трапезников Ю.М. Экспериментальные исследования возможности всплытия подводного судна в сплошных льдах.....	277
Болотин А.А. Математическое моделирование движения экраноплана при разгоне...	283
Захаров Л.А., Химич В.Л., Захаров И.Л., Тарасов А.Н., Дегтярев А.В. Анализ технических характеристик и тенденций развития атмосферных поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	287
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	298
Наумец А. Е., Таганов Р.С., Мирясов Г.М., Титов В.Г. Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника.....	298
Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Система управления автономным дизель-генератором переменной частоты вращения.....	303
Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Городские распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией.....	309
Байков А.И. Математические модели трансформаторов при анализе силовой части электроприводов.....	316
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	328
Трифонов Ю.И., Героцкий В.А., Курилина Т.Д. Способ упрочнения оболочковых форм жидкоподвижным опорным наполнителем.....	328
Терещенко Е.Г., Галкин В.В., Дербенев А.А. Исследование структуры и свойств высокопрочной коррозионностойкой стали мартенситного класса после высокого отпуска.....	334
Казанский Л.П., Сивков В.Л., Бистина Л.М. Исследование влияния режимов термообработки на качество проката из конструкционных низколегированных сталей марок 26Г2СБА И 25ХГМНТБА.....	340
Ошурина Л.А. Особенности прерывистого распада в прецизионных сплавах.....	346
Сенопальников В.М., Сивков В.Л. Формирование поверхностной структуры в слитках спокойной стали.....	352
Редькина Н.В. Разработка схем термоциклической обработки на примере сплава 44НХТЮ.....	358
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	362
Мошкова А.Н., Сергеева Т.Ф., Хватова Е.М., Тежикова Н.П. Оценка степени тяжести ишемии по активности изоферментов креатинфосфокиназы мозга методом эмпирических зависимостей.....	362
Гольденгорин Б.И., Кочетуров А.А. Анализ финансовых рынков средствами модели О Р-медианах.....	367

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	11
Bukin P.E., Frolova I.N., Kutilova O.I. Automatic choice of the set of bases at full basing of the detail in the machine adaptation	11
Dementev V.I., Kabaldin Yu.G. Schemes subjects work in service.....	18
Krainov V.V., Tudakova N.M., Frolova I.N. Peculiarities of employing electric plasma treatment.....	25
Konishchev D.H., Konishchev K.D. Calculation of steel thermal coefficients according to their chemical composition and the temperature dependence of the non-ferrous metal thermophysical properties.....	31
Kulikova E.A., Grebneva T.N. Formalization of design of route of processing of body parts on machining center.....	37
Kryukov L.T. Determination of the moment of the material transition from plastic into brittle state using parameters of microplastic deformation.....	48
Panov A. Yu., Smirnov D.A. Analyses of the inertial effects on the rotors of power gyroscopes.....	54
...	
Ivanov A.A. The calculation of the characteristics of the piezoengine with longitudinal polarization.....	61
Kaynova V.N., Demyanovich E.M. The role of the term «qualified tolerance» affects cost reduction and labor content in the manufacturing of irresponsible assembly.....	66
Mantserov S.A., Malinov I.V. Creating a system of operational management of delivery using cloud computing.....	73
Shestoperov V. Yu. Cavitation damage of materials and criteria for assessing the erosion resistance.....	79 84
Petrovsky A.N. Novikov gearing parameters optimization problem.....	95
Tikhonov V.M., Utkin E.A. Processes of forming surface layers of machine parts.....	
Laptev I.L., Tikhonov V.M. Technology and automated system for water-based cutting emulsion production and fluid supply in metalworking industry.....	102 108
Naumov V.F., Frolova I.N. Global coordinate system in the metal system.....	
Kabaldin Yu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Vytnov Y.V., Golubev S.V. Evaluation of cutting tool in real time based approaches nonlinear dynamics using nvidia cuda software environment labview.....	114
Kuzmishina A.M., Kretinin O.V., Vlasov E.E., Sery S.V. Study on properties of binary intermetallics «from first principles» based on quantum-mechanical calculations using CUDA....	122 129
Kraynov V.V., Ponomarev M.V., Frolova I.N. Analysis format data step.....	135
Smirnov D.A. Analysis of the kinematic characteristics of rocker mechanism.....	142
Smolensky S. Yu., Pavlov A.S. Projection welding of hinges.....	
Belyavsky G.I., Zinoviev Yr.A., Kuznetsov S.V. Producing cast blanks reinforced with mechanically alloyed grains via casting with crystallisation under pressure.....	148
Zinoviev Yu.A., Kolpakov A.A., Kuznetsov S.V., Shvetsov V.D., Belyavsky G.I. Creating the base technology of producing same-heat low-sulfur and high-sulfur irons.....	154
Beliavsky G.I., Kuznetsov S.V., Zinoviev Yu.A., Shvetsov V.D. Pressure crystallization for bimetal castings manufacturing.....	162
Guschin A.N., Gusev Y.B., Sozinov S.V. Behavior of low carbon steel previously deformed	168

under static and cyclic loading.....	
Hranilov V.P., Teslenko E.V., Andreev V.V. The analysys of the dynamic design-engineering interaction management model in cad.....	177
Kabaldin Yu.G., Laptev I.I., Shatagin D.A., Zotov V.O., Sery S.V. Diagnosis tool wear based on the fractal and wavelet analisis using artificial intelligence in real time with remote access capabilities.....	183 190
Sery S.V. Matemathical modeling of nanostructures with specified properties.....	197
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	
Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Khrobostov A.E. Study of coolant mass transfer behind the VBER-300 fa mixing gridsin order to substantiate their effectiveness.....	197
Dmitriev S.M., Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Kotin A.V. Study of the non-stationary temperature field and thermopulsation's characteristics of collector unit as part of the nuclear power station's heat exchanger.....	206
Beznosov A.V., Iarmonov M.V., Novozhilova O.O., Meluzov A.G., Zudin A.D, Chernish A.S. Thermal-hydraulic characteristics of the flow of a heavy liquid metal coolant when the transverse flow around the beam pipe with regard to reactor power plan with HMLC.....	213
Novoselova N.A., Rudoyasova L.G. About statement homogeneous problem on maxwell equations.....	226
Danilov A.V., Radionov A.A. Calculation of bulk acoustic waves propagating in the crystal LiNbO_3	233 239
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	
Vasiliev A.A., Kostin S.Y., Sergievskiy S.A., Stepanov E.V., Tumasov A.V. Simulation of curvilinear motion of road train in adams /car software.....	239
Anuchin I.E., Butin D.A., Belyakov V.V., Goncharov K.O. Simulation and experimental study of speed and tractive characteristics of formula student racing car.....	246
Konikova G.A., Sereda P.V., Trusov Y.P., Shashkina K.M. Simulation and experimental study of light commercial vehicles active safety.....	259 260
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	
Kosolapov E.A., Solennikov M.D. Quasi one-dimensional approach gas flows calculation in power plant channels	260
Zuev V.A., Semenova N.M., Kravchenko V.A. Experiment researches of ice-breaking air cushion platform ice resistance in broken ice.....	268
Antonov V.C., Gramuzov E.M., Zhev V.A., Larin A.G., Trapeznikov U.M. Experimental studies of the possibility of ascent the submarine in a continuous ice.....	277 283
Bolotin A.A. Mathematical modeling of wig vehicle motion during its take-off run.....	287
Zakharov L.A., Khimich V.L., Zakharov I.L., Tarasov A.N., Degtyarev A.V. Performance analysis and trends of atmospheric internal combustion piston engine.....	287 298
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	
Naumets A.E., Taganov R.S., Kuzmenkov A.N., Miryasov G.M., Titov V.G. Optimization of current control circuit of electromagnetic bearing.....	298
Daryenkov A.B., Khvatov O.S. Control system of autonomous diesel generator	303

characterized by alternating frequency rotation of shaft	
Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A., Zyryin D.V. Urban distribution electric grids 10-20 kV with hexagonal configuration.....	309
Bayakov A.I. Mathematical models of transformers when analyzing power part of electric drives.....	316
	328
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	
Triakonov Y.I., Gerotsky V.A., Kurilina T.D. Metod of hardening of the shell mold by the fluid bearing filler.....	328
Tereshenko E., Galkin V., Derbenev A. High-strength, wear resistance steel of the martensitic type structure and properties investigation after the high tempering.....	334
Kazansky L.P., Sivkov V.L., Bistina L.M. Investigation of heat mode on quality rolled products of structural low-alloy steel 26g2sba and 25HGMNTBA.....	340
Oshurina L.A. Characteristics of intermittent collapse of precision alloys.....	346
Senopalnikov V.M., Sivkov V.L. The formation of the surface structure of ingots of quiet steel.....	352
Redkina N.V. Development of schemes for thermocyclic processing of alloy 44HXTIO.....	358
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL AND SOCIAL SCIENCES	362
Moshkova A.N., Sergeeva T.F., Khvatova E.M., Tezhikova N.P. Estimation of severity degree of ischemia by the activity of the brain creatine phosphokinase isoenzymes using the method of empirical dependences.....	362
Goldtngorin B.I., Kocheturov A.A. The analysis of the finansial markets by means of the r–median model.....	367

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.9

П.Э. Букин¹, И.Н. Фролова¹, О.И. Кутилова²

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР КОМПЛЕКТА БАЗ ПРИ ПОЛНОМ БАЗИРОВАНИИ ДЕТАЛИ В СТАНОЧНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ

ОАО ПКО «Теплообменник»¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассмотрен вопрос автоматического выбора комплекта технологических баз. Приводятся разновидности комплектов баз, количественные соотношения для выбора главной базовой поверхности. В основу выбора главной базы положено сравнение площадей треугольников, построенных на базовых поверхностях заготовки. Рассмотрено построение базирующего треугольника. Использование выведенных зависимостей позволяет определить комплект баз на любой детали в автоматическом режиме. Приведены основные принципы построения алгоритма выбора комплекта баз при полном базировании детали.

Ключевые слова: поверхность, базирование, комплект баз, главная база, технологическая подготовка производства.

Современные тенденции в машиностроении постоянно требуют от руководителей предприятий снижения сроков на разработку и выпуск принципиально новых изделий. Наиболее значимой процедурой при этом является технологическая подготовка производства, в которой самая трудоемкая область связана с механической обработкой изделий. На большинстве отечественных заводов подразделения, занятые в технологической подготовке механообработки, делятся на три крупные составляющие: собственно технологов по механической обработке, которые и разрабатывают технологические процессы, и два конструкторских бюро (КБ), относящихся к службе главного технолога – КБ инструмента и КБ оснастки. Причем, если инструмент обычно проектируется по заведомо определенным алгоритмам, то приспособления, несмотря на наступление века информатизации, продолжают в основном разрабатывать исходя только из знаний и опыта специализированных конструкторов. Производители компьютерных систем при этом (в лучшем случае) предлагают лишь базы данных, позволяющих только облегчить работу конструктора, но не автоматизировать выполнение данной задачи.

Одной из главных сложностей на пути к автоматизации в указанной области является зависимость одного сектора технологической разработки от другого. Немыслима полная автоматизация разработки оснастки без автоматизации разработки технологического процесса, которая в свою очередь не автоматизируется без грамотно построенной информационной модели детали с указанием всех наложенных на поверхности допусков. Таким образом, автоматизация одного направления технологической подготовки производства невозможна без автоматизации другого.

Первым шагом на пути к созданию системы автоматического построения специально станочного приспособления является разработка алгоритма выбора главной базы на обрабатываемой детали. При этом надо учитывать, что на этапе автоматической разработки при-

способления используется уже выбранный ранее на этапе автоматической разработки технологического процесса набор поверхностей на обрабатываемой детали, которые будут играть роль технологических баз [3]. Теперь необходимо на этом наборе поверхностей построить комплект технологических баз.

Представим возможные комплекты баз (табл. 1). Анализ табл. 1 позволяет сделать выводы:

- любой из комплектов баз может быть наложен на поверхность практически любого типа. Это сразу усложняет задачу выбора комплекта баз
- наиболее часто применяются только две главные базы (ДН и У), так как ТО – это крайне редкая в практике главная база, наиболее ярким примером которой может служить шарнирное соединение.

Таблица 1

Перечень возможных комплектов баз

Комплект баз	Поверхности, на которые комплект может быть наложен
У-ДО-О	Плоская или свободной формы - Вращения - Любая
У-Н-О	Плоская свободной формы
ДН-ДО	Вращения
ДН-О-О	Вращения - плоская свободной формы
ТО-Н-О	Вращения свободной формы - Плоская свободной формы
ТО-ДО-О	Вращения свободной формы - Плоская свободной формы

Примечание: У – установочная база; О – опорная база; ДО – двойная опорная; ТО – тройная опорная [1]; Н – направляющая, ДН – двойная направляющая.

Для начала осуществим выбор главной базы. Главной является та база, которая обеспечивает наибольшую устойчивость обрабатываемой детали. Поскольку наибольшую устойчивость заготовке дает установка на поверхность наибольшей площади, то базовые поверхности заготовки для выбора главной базы нужно сравнить по площадям.

Из геометрии известно, что наибольшую и достаточную устойчивость дает треугольник, значит, сравнение должно производиться по площадям треугольников, построенных по базовым поверхностям. Базирующий треугольник легко прорисовывается при наложении установочной базы на базовую поверхность заготовки. При этом выбор базовой поверхности заготовки для наложения установочной базы всегда ведется по принципу: в какую из поверхностей можно вписать треугольник наибольшей площади.

Рассмотрим построение базирующего треугольника при наложении ДН и ТО на базовые поверхности заготовки. Для этого обратимся к рис. 1, на котором приведен классический пример базирования в призму (ДН) (рис. 1, а) и пример базирования по шарниру (ТО) (рис. 1, б).

Сначала проведем сравнение между треугольником главной базы У и треугольником главной базы ДН. Рассмотрим более подробно рис. 1, а. Видно, что призма и деталь контактируют по двум линиям (на рисунке изображены штриховыми линиями). Если заштриховать фигуру, образованную данными линиями и торцами детали, то получается прямоугольник с вершинами в точках 1, 2, 3 и 4. Очевидно, что данный прямоугольник и создает устойчивость базирования при главной базе ДН. Также очевидно, что прямоугольник излишен для создания устойчивости и четвертая теоретическая точка требуется не для создания устойчивости, а для лишения детали дополнительной степени свободы. Приходим к выводу, что максимальный по площади треугольник, вписанный в данный четырехугольник, и будет являться базирующим треугольником наибольшей площади.

Теперь необходимо найти математическое соотношение между базирующими треугольниками, образованными при наложении на одну и ту же базовую поверхность заготовки установочной или двойной направляющей базы. Для этого пересчитаем площадь найден-

ного в цилиндре прямоугольника через известные размеры заготовки. Наиболее подходящими для этого размерами являются габариты осевого сечения тела вращения (сечения, проходящего через его ось).

Найдем коэффициент перевода от базирующего сечения к осевому сечению. Рассмотрим несколько возможных схем установки (рис. 2).

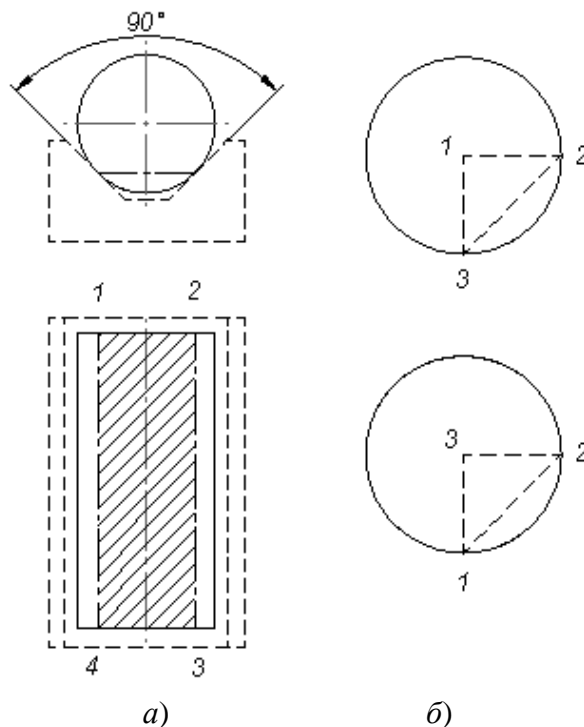


Рис. 1. Определение геометрической связи между главными базами:
a – пример базирования в призму (ДН);
б – пример базирования по шарниру (ТО)

При базировании по главной базе ДН применяют одну из двух схем:

- схему установки с базированием поверхности вращения в угол 90° (рис. 2, *a*);
- схему установки с базированием поверхности вращения в угол 60° (рис. 2, *б*).

В обеих схемах искомое сечение представлено в виде штриховой линии.

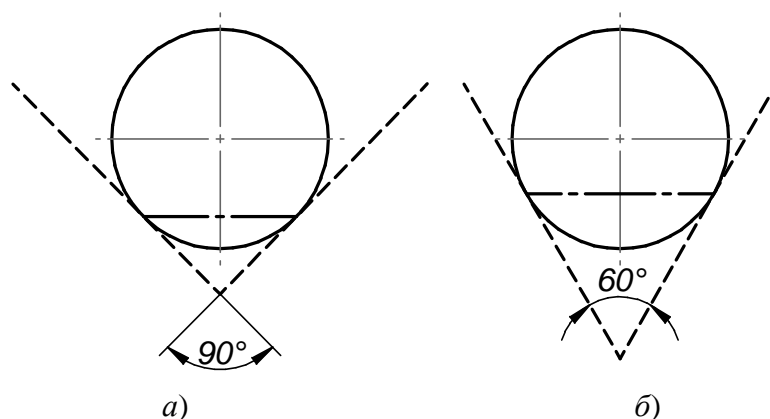


Рис. 2. Примеры схем установки при главной базе в виде ДН:
a – установочные поверхности под углом 90° ;
б – установочные поверхности под углом 60°

Произведем расчет коэффициента перевода от базирующего сечения к осевому сечению сначала в буквенном виде. Исходя из теоремы о сумме углов многоугольника:

$C = 180(n - 2)$, где C - сумма углов многоугольника, град.; n - количество углов многоугольника.

В нашем случае получим (рис. 3) $C = 180^\circ * (4 - 2) = 360^\circ$. Учитывая, что углы c и d получены исходя из касательности линии и окружности, то они составляют по 90° , получим:

$$a + b + c + d = 360^\circ, \quad a + b + 90^\circ + 90^\circ = 360^\circ, \quad a + b = 180^\circ, \quad b = 180^\circ - a.$$

Определив угол b и учитывая, что штриховой треугольник является равнобедренным, имеем следующую зависимость ширины опорного сечения от радиуса цилиндра:

$$\begin{aligned} \frac{H}{2} &= R \sin \frac{b}{2} = R \sin \left(90^\circ - \frac{a}{2} \right), \\ H &= 2R \sin \left(90^\circ - \frac{a}{2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

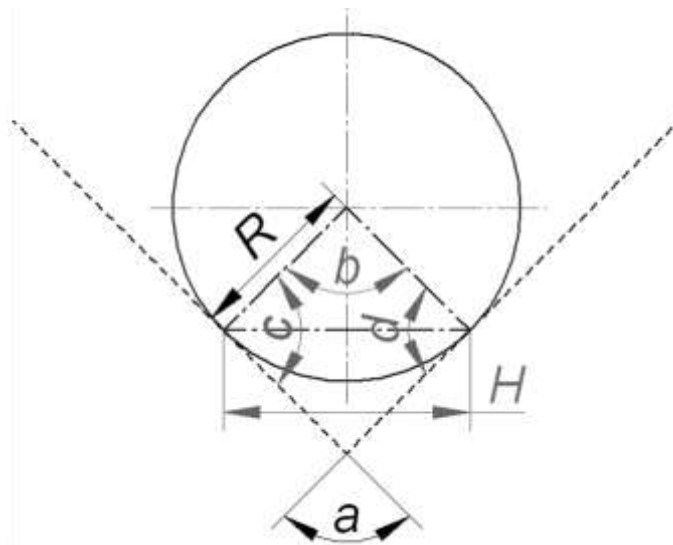


Рис. 3. Определение соотношения между установочным сечением и основными параметрами поверхности

Учитывая формулу (1) и то, что угол a может принимать только два значения (60° и 90°), проведем расчет соотношения ширины опорного сечения и радиуса цилиндра для двух вариантов угла a :

$$H_{60^\circ} = 2R \sin(90^\circ - 60^\circ/2) = 2R \sin 60^\circ = 1,73R \text{ – для установки в призму с } a=60^\circ, \quad (2)$$

$$H_{90^\circ} = 2R \sin(90^\circ - 90^\circ/2) = 2R \sin 45^\circ = 1,41R \text{ – для установки в призму с } a=90^\circ. \quad (3)$$

Определим параметр выбора между ДН и У-базами. Для этого рассмотрим элементарный цилиндр (рис. 4, а). Пользуясь уже приведенным правилом – главной базой является база, обеспечивающая наибольшую устойчивость, – рассмотрим три возможных схемы базирования этого цилиндра (на торец по У-базе и две по ДН, с углами установки в 60° и 90°) и выведем соотношения между ними. Для этого сравним торец цилиндра, установленного по правилам установочной базы и собственно саму цилиндрическую поверхность, установленную по правилам двойной направляющей базы. Из законов математики известно, что треугольник, вписанный в окружность, имеет наибольшую площадь при условии равенства его сторон (рис. 4, б).

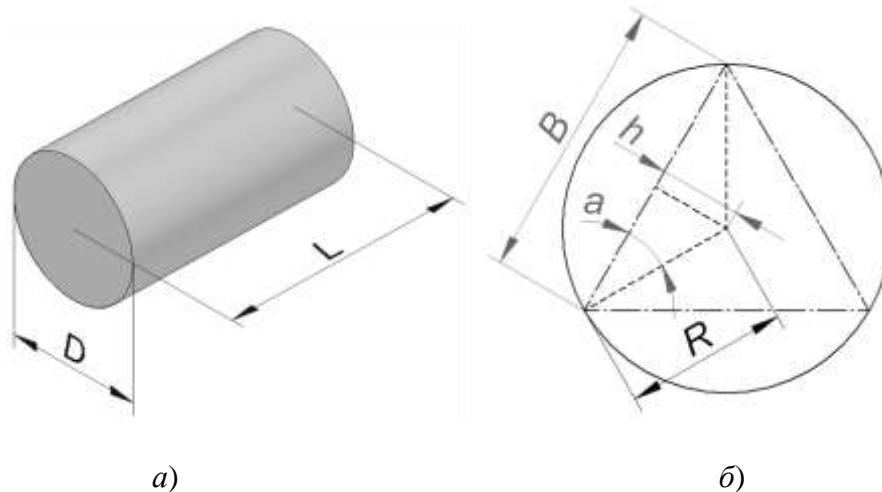


Рис. 4. К расчету площадей У и ДН баз:

a – устанавливаемая деталь;

б – определение максимальной площади вписанного в окружность треугольника

Найдем площадь данного треугольника по формуле

$$S_y = 0,5B(R + h). \quad (4)$$

Найдем значения неизвестных *B* и *h*. Линия, соединяющая вершину треугольника и центр описанной окружности, для окружности является радиусом, а для треугольника - биссектрисой, из чего следует, что угол $a=30^\circ$ (треугольник равносторонний, каждый из его углов по 60°). Определим искомые неизвестные:

$$h = R \sin a = R \sin 30^\circ = 0,5R; \quad h = R \sin 30^\circ;$$

$$B = 2R \cos a = 2R \cos 30^\circ = 1,73R.$$

Подставим найденные значения в формулу (4) и определим площадь опорного треугольника для У-базы:

$$S_y = 0,5B(R + h) = 0,5 \cdot 1,73 \cdot R(R + 0,5R) = 1,3R^2. \quad (5)$$

Определим площади опорных треугольников для ДН при обеих схемах установки:

$$S_{60^\circ} = 0,5H_{60^\circ}L = 0,5 \cdot 1,73RL = 0,87RL, \quad (6)$$

$$S_{90^\circ} = 0,5H_{90^\circ}L = 0,5 \cdot 1,41RL = 0,71RL. \quad (7)$$

Учитывая, что максимальная площадь вписанного в центральное сечение треугольника находится по формуле $S_{ц} = RL$, получаем коэффициенты перевода площадей максимальных осевых треугольных сечений в площади опорных треугольных сечений: $S_a = k_a S_{ц}$. Для упрощения расчетов площадей опорных треугольных сечений при выборе главной базовой поверхности искомые коэффициенты примут следующие значения:

- для установки в угол 60° $k_{60^\circ} = \frac{S_{60^\circ}}{S_{ц}} = 0,87$;
- для установки в угол 90° $k_{90^\circ} = \frac{S_{90^\circ}}{S_{ц}} = 0,71$.

Эти коэффициенты действительны для любых поверхностей вращения при установке их по рассмотренным схемам.

Получив формулы расчета площадей опорных треугольников, произведем их сравнение для выбора между У и ДН-базами.

1. Если площадь торцевой поверхности больше площади опорного треугольника поверхности вращения ($S_y > S_{60^\circ}$), то в качестве главной базы следует принимать У.

2. Если ($S_y < S_{90^\circ}$), то в качестве главной базы следует принимать ДН.

3. Если $(S_{90^\circ} < S_y < S_{60^\circ})$, то следует сначала определиться с углом базирования поверхности вращения.

4. При равенствах $S_y = S_{60^\circ}$ или $S_y = S_{90^\circ}$ схемы установки на главную базу У и на главную баз ДН с соответствующим углом равнозначны, должны рассматриваться оба варианта главной базы.

Определим коэффициенты, определяющие выбор главной базы между установочной и двойной направляющей базой.

Для соотношений (5) и (6):

$$\begin{aligned} S_y &= S_{60^\circ}, \\ 1,3R^2 &= 0,87RL, \\ R &= 0,67L. \end{aligned} \quad (8)$$

Для соотношений (5) и (7):

$$\begin{aligned} S_y &= S_{90^\circ}, \\ 1,3R^2 &= 0,71RL, \\ R &= 0,55L. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, в общепринятом виде получим соотношение $L/D = 0,75 \dots 0,91$.

Получив соотношения для выбора между ДН и У базами по основным параметрам базовых поверхностей, сделаем то же самое для тройной опорной базы.

Исходя из вышесказанного про равносторонний треугольник и того, что его сторона B по рис. 1, б получается равной $B = (R^2 + R^2)^{0,5} = 1,41R$, найдем площадь данного треугольника по формуле

$$S = (3^{0,5}/4)B^2 = (3^{0,5}/4) \cdot (1,41R)^2 = 0,86R^2.$$

Определив необходимые параметры для выбора главных баз, можно построить алгоритм выбора комплекта баз. Приведем несколько тезисов, которые должны быть отражены в алгоритме в обязательном порядке:

- рассматриваются комбинации поверхностей, отвечающие за одну и ту же базирующую функцию [2];
- рассматривается только полное базирование;
- должно быть рассмотрено не менее трех групп поверхностей: ПВ – поверхности вращения; СП – сферические поверхности; ППиСФ – плоские поверхности или свободной формы;
- все возможные структурные комбинации данных поверхностей требуется рассмотреть в обязательном порядке;
- на входе в алгоритм должны быть известны геометрические параметры всех поверхностей, а именно: максимальные значения площади треугольника (для поверхности вращения (кроме сферических) в осевом сечении), расстояния между двумя точками, принадлежащими поверхности (для поверхности вращения: расстояние между точками в той же плоскости, что и ось, при этом не пересекая ее); величина хорды, соединяющей точки силуэта для поверхностей вращения.

Представленные положения позволяют определить комплект баз на любой детали в автоматическом режиме, что является одним из важнейших шагов на пути к созданию системы автоматического построения специального станочного приспособления.

Библиографический список

1. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов: учебник для вузов: В 2 ч. / В.А. Горохов [и др.]; под ред. В.А. Горохова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. Ч. 1. – 496 с.

2. **Букин, П.Э.** Создание модифицированных поверхностей как шаг к автоматическому построению станочного приспособления / П.Э. Букин, И.Н. Фролова / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 4 (91). С. 107–112.
3. **Кутилова, О.И.** Способ построения схемы обработки детали на основе размерного синтеза технологического процесса / О.И. Кутилова, С.Ф. Магницкая, И.Н. Фролова // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. №10. С. 28–33.

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

Р.Е. Bukin¹, I.N. Frolova¹, O.I. Kutilova²

**AUTOMATIC CHOICE OF THE SET OF BASES AT FULL BASING
OF THE DETAIL IN THE MACHINE ADAPTATION**

JSC «Теплообменик»¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: The problem of automatic selection of a set of technological bases.

Design/methodology/approach: Are sets of species databases. Quantitative relations for the choice of the main base surface. The basis of the selection of the main base area laid comparison triangles of the base surface of the workpiece. The construction of the triangle is based.

Findings: The use of derived dependencies to determine the set of bases in any detail in the automatic mode.

Originality/value: Are the basic principles of building a set of database selection algorithm with the full details of basing.

Key words: surface, basing, a set of databases, the main base, technological preparation of production.

УДК 331.1

В.И. Дементьев, Ю.Г. Кабалдин

**СХЕМА ОТНОШЕНИЙ СУБЪЕКТОВ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
В СФЕРЕ УСЛУГ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Выделены основные функционально обусловленные компоненты субъектов трудовой деятельности в сфере услуг и их описание. Приведена схема отношений лиц, принимающих решение в качестве заказчика и исполнителя услуг, как представителей интересов обслуживаемой и обслуживающей систем. Рассмотрена роль эргономической системы как компонента обслуживающей системы по преобразованию объекта обслуживания (операнда) для достижения искомой цели.

Ключевые слова: субъекты трудовой деятельности, сфера услуг, потребности и возможности, обслуживаемая и обслуживающая системы, заказчик и исполнитель услуг, операнд, эргономическая система, функционально обусловленные компоненты, отношения взаимосвязей и взаимодействий.

Предпринята попытка схематизировать цельно структурированное представление функционально обусловленных компонентов трудовой деятельности в сфере услуг заинтересованных субъектов и лиц, принимающих решения. Унификация компонентов, выявление элементов симметрии между ними позволяет снять неопределенность при построении моделей их функционирования с целью оценки и повышения уровня удовлетворения потребительского спроса на рынке услуг. До настоящего времени такие работы проводились либо на уровне решения локальных задач, либо с недостаточной степенью обобщенности из-за отсутствия цельно структурированного взгляда на эту проблему, в том числе с позиций эргономики. В статье рассмотрены наиболее важные компоненты субъектов и объектов трудовой деятельности в сфере услуг, их взаимосвязи и взаимодействия, необходимые для прогнозирования и реализации достижения искомых целей.

Прежнее понимание, например, малой социальной группы или отдельной машины, сменилось современным пониманием их как социально-технических систем [1]. Человек, как биосоциальный субъект достиг такого совершенства (прямоходящий, геометрически гармонично сложенный, разумный), что созрел для обеспечения своего существования и развития не только, и не столько через адаптацию к окружающей среде, сколько через сознательную реализацию своих потребностей посредством трудовой деятельности в материальной и духовной сферах.

Разделение труда позволяет не участвовать в производстве одного продукта с начала до конца. В обществе каждый индивидуум зависит от других, поэтому нуждается в обслуживании.

Услуга представляет собой чье-либо действие, приносящее пользу. Работа же по оказанию услуг, то есть по удовлетворению чьих-либо потребностей, называется **сервисом**. В качестве показателя, характеризующего оценку качества сервиса, используется понятие **уровень сервиса обеспечения потребительского спроса**. Услуги в основном неосвязаемы и не приводят к овладению чем-либо. Производство услуг может быть, а может и не быть связано с товаром в его материальном виде. Услуга в общем случае имеет материально-вещественную и сервисную компоненты, которые могут находиться в разных соотношениях. Услугам присущи четыре характеристики: неосвязаемость, неотделимость от своего источника, непостоянство качества, несохраняемость [2].

В народнохозяйственном комплексе выделяют **социальную, производственную сферы и сферу услуг**. В российской экономике сфера услуг составляет почти половину произведенного ВВП. В ее состав входят отрасли и предприятия, обеспечивающие жизнедеятельность населения и функционирование производства. Развитие сферы услуг непосредственно связано с процессами ее интеграции с производственной и социальной сферами общественной жизни. Уровень развития этой сферы, как правило, отражает уровень развития страны, ее экономический потенциал.

Согласно классификатору Госкомстата РФ, к сфере услуг относятся: просвещение, здравоохранение, искусство, культура, наука, аппарат органов государственного управления, вооруженные силы, ЖКХ, пассажирский транспорт и связь по обслуживанию населения, торговля в части продажи товаров.

Труд в сфере услуг, в которой создаются все нематериальные формы богатства, социально равноправен труду, затрачиваемому в сфере производства, где производятся материально-вещественные продукты. И в той, и в другой сферах затрачивается психофизиологическая энергия человека. Единственно чем различаются эти виды труда – это неосвязаемость и пространственная неотделимость продуктов туда в сфере услуг от производственного акта в сфере производства. Таким образом, труд – это основное, что связывает сферу материального и нематериального производства.

Обслуживание можно интерпретировать как свойство, и как процесс. Обслуживание как свойство (*Maintainability* – обслуживаемость), входит в состав эргономических комплексных показателей и определяется понятием *эргономичность*, которое характеризует удобство, наряду с такими свойствами, как управляемость, осваиваемость и обитаемость.

Обслуживание как процесс отражается термином *Maintainance* – эксплуатация, уход, ремонт (текущий), содержание, обслуживание, поддержание.

Независимо от сферы деятельности человек, изначально формируя образ потребного будущего, создает вторую, искусственную Природу со всеми своими позитивными и негативными последствиями. Резонно считать, что деятельность человека последовательно проходит этапы своего развития в составе биосоциальных, социально-технических и биотехнологических систем. На любом этапе человек выступает как основной компонент трудовой деятельности в разных качествах в зависимости от специфики потребностей, интересов и рода деятельности.

Оказывая услуги (прямо или косвенно), человек-исполнитель за выполненную работу получает эквивалент труда – оплату. Имея оплату труда, он становится заказчиком или покупателем услуг (товаров), которые сам не в состоянии выполнить. При этом он обращается в соответствующие службы (специализированные предприятия по оказанию услуг), где эту работу могут профессионально выполнить другие исполнители (специалисты).

Иницирующим фактором трудовой деятельности человека и общества является потребность (понимаемая в контексте с возможностью ее реализации) как необходимое условие для их существования и развития.

Потребность человека (общества) является исключительным свойством его социальной деятельности, которая формирует образ потребного будущего через мотивационную сферу и проявляется в материальной и духовной сферах. Заметим, что мотив-цель – это потребность, как разница между тем, что есть и тем, что хочется. Желание – это нереализованная потребность, относится к сфере мотивации. Потребность же предполагает не только мотивацию, но и цель, которая может изменяться в процессе удовлетворения потребности. Потребность и спрос – не одно и то же. Спрос – это отношение потребностей к потенциальным возможностям их реализации, которые определяются затратами материальных, физических и умственных способностей человека.

Функционально обусловленные компоненты трудовой деятельности человека в сфере обслуживания вытекают из потребностей общества.

Компоненты трудовой деятельности определяются описанием структуры потребности [3]:

$$P = (D, G, H),$$

где P – потребность; D – необходимое действие; G – объект обслуживания; H – особые условия, в частности, окружающая естественная или искусственно созданная производственная (бытовая) среда C .

Необходимое действие D может осуществляться непосредственно человеком (группой людей) – Ч либо с помощью технических средств деятельности, включая машины – М, либо более сложные технические системы и комплексы, например, в рамках социотехнических систем.

Между функционально обусловленными компонентами эргономической системы (как

системы «объект») имеют место отношения взаимосвязи (по номиналу и отклонениям). Их доминирующая направленность для достижения требования соответствия определяется этапом жизненного цикла эргономической системы, а именно, существующая (исследуемая) эргономическая система, с одной стороны, или проектируемая – с другой. Труд, как система «процесс», характеризуется реализацией потребности в процессе функционирования эргономической системы. В этом случае между функционально обусловленными компонентами имеют место отношения не только взаимосвязи, но и взаимодействия.

Указанные функционально обусловленные компоненты трудовой деятельности такие, как человек-оператор (Ч), предмет труда (ПТ), машина (М), среда (С), определяют **эргономическую систему**. В общем случае эргономическую систему можно аппроксимировать на социально-технические системы. Функционирование этой системы основано на взаимосвязях («система – объект») и взаимодействиях («система – процесс») ее компонентов по материальным (М) информационным (J) и энергетическим (Е) потокам [4].

Характерные черты эргономической системы определяются следующими положениями:

- без человека невозможны никакие виды орудий труда и производственного оборудования; они возникли одновременно с человеком и развивались вместе с ним;
- постоянно ускоряющееся развитие эргономической системы;
- обязательность соответствия особенностей конструкции производственного оборудования анатомо-физиологическим и психофизиологическим особенностям человека.

Таким образом, доминирующая роль человека в трудовой деятельности проявляет **антропологический аспект эргономической системы** [5].

Создаваемые человеком средства труда (удобные и красивые), и предназначенные для удовлетворения потребностей социального заказа в естественной, или искусственно созданной человеком среде, определяет его место как субъекта – творца и как субъекта – пользователя.

Любой субъект, заинтересованный в удовлетворении своих личных и общественных потребностей, может выступать как в составе **обслуживаемой системы** в качестве лица, принимающего решение заказчика (ЛПРз), так и в составе **обслуживающей системы** в качестве лица, принимающего решение исполнителя (ЛПРи).

Обслуживаемая система включает в себя в качестве компонентов источники и отправители осведомительной информации в отношении ЛПРз и объекта обслуживания. Поток осведомительной информации поступает в обслуживающую систему (ЛПРи), которая включает в себя в качестве компонентов приемники осведомительной информации, систему управления и отправители командной информации через исполнительные (эргономические) системы. В качестве приемников командной информации выступает объект обслуживания (операнд), конечное состояние которого оценивается заказчиком, т.е. ЛПРз. В общем случае отношения представителей обслуживаемой в лице ЛПРз и обслуживающей систем в лице ЛПРи можно рассматривать с позиций игровых недетерминированных систем.

Схема отношений заинтересованных субъектов и объектов трудовой деятельности в сфере услуг представлена на рис. 1 тонированным фоном выделены однородные по названию и симметрично расположенные компоненты обслуживаемой и обслуживающей систем, объект обслуживания, эргономическая система и две пары встречных потоков спроса и предложения.

К основным компонентам трудовой деятельности в сфере обслуживания относятся обслуживаемая и обслуживающая системы, имеющие общий объект, который определяется как операнд (человек, люди, техника, среда, а также отдельно взятые, или совместно функционирующие материальные (М), информационные (J) и энергетические (Е) потоки). Обслуживающая система в свою очередь включает в себя в качестве необходимой компоненты эргономическую систему.

К объекту обслуживания (операнд) имеют отношения три субъекта - ЛПРз, ЛПРи и человек-оператор, принадлежащий обслуживающей системе и входящий в состав эргономической системы в качестве непосредственного исполнителя услуг.

1. Обслуживаемая система в представительстве ЛПРз включает в себя следующие компоненты:

1.1. Объект обслуживания (**операнд**) на правах владения, пользования.

1.2. Собственно обслуживаемый субъект (ЛПРз), который для принятия того или иного решения из множества альтернатив должен иметь:

- образ исходного и конечного состояния объекта обслуживания;
- прогноз возможности и целесообразности поддержания работоспособного или исправного состояния объекта обслуживания на этапах жизненного цикла объекта и жизненного цикла услуг в отношении к объекту (образ потребного состояния объекта);
- мотивы, информацию и критерии по следующим категориям:
- потребности;
- возможности;
- информацию от обслуживающего субъекта (ЛПРи): виды сервисного обслуживания, номенклатура, количество и качество предоставляемых услуг, цена услуг, сроки выполнения, надежность, место нахождения, юридические документы на право оказывать услуги, гарантии;
- описание собственности или выделение каких-либо локальных элементов объекта обслуживания;
- блок сравнения альтернатив, в котором сопоставляются различные варианты последующих действий по определенным критериям;
- блок (этап) принятия решения и оформления заказа (договора);
- возможность оценки уровня сервиса потребительского спроса и соответствующих гарантий.

2. Обслуживающая система в представительстве ЛПРи включает в себя следующие компоненты:

2.1. Объект обслуживания (**операнд**) на правах временного (на период обслуживания) владения, пользования.

2.2. Средства обслуживания, принадлежащие ЛПРи в составе эргономической системы.

2.2.1. Эргономическая система характеризует сервисные мощности специализированного предприятия по оказанию услуг и включают в себя:

- **операнд**, с возможностью воздействовать на него (по материальным, энергетическим и информационным потокам) с целью преобразования значений параметров из начального в требуемое конечное состояние;
- **человека-оператора**;
- средства труда (машины и оборудование, рабочее место);
- средства их обеспечения;

2.2.2. Средства диагностики для оценки исходного состояния операнда.

2.2.3. Контрольно-измерительные средства для контроля промежуточного и конечного состояния операнда.

2.3. **Обслуживающий субъект**, в качестве которого выступает ЛПРи (как работодатель), который для принятия того или иного решения из множества альтернатив должен иметь мотивы, информацию и критерии по следующим категориям:

- потребности, например, в форме функции доходов, объемов продаж, ожидаемой прибыли;
- возможности (сервисные мощности, перечень и количество предлагаемых услуг, уровень квалификации и состав исполнителей услуг, затраты на развитие производства, маркетинговые исследования, повышения качества услуг, обеспечения запасными частями и комплектующими изделиями и т.п.);
- информацию от ЛПРз и других источников, например, в форме потока заявок на обслуживание, объемов продаж, ценовой политики, сведения о конкурирующих фирмах, организации рекламной компании, формы предоставления с учетом места и времени и др.;

- правовые документы в отношении собственности (аренды, владения) и лицензирования деятельности специализированного предприятия-производителя услуг, правах потребителей и т.п.;
- гарантии обеспечения требуемого уровня сервиса;
- блок анализа и сравнения альтернатив;
- блок принятия решений: по обслуживанию ЛПРз, ценовой политике, качеству предоставляемых услуг, заключению внешних договоров на поставку запасных частей и комплектующих, кредитной политике, стратегии развития фирмы, маркетинговым исследованиям и т.п.

3. Потоки и взаимодействия

Потоки отражают отношения взаимосвязи между функционально обусловленными компонентами как системы «объект» (прямые, обратные, нейтральные), а взаимодействия, относящиеся к компонентам как системы «процесс», предполагают наличие у каждого из компонентов действующего и воспринимающего звеньев.

3.1. Информационные потоки по номенклатуре и количеству услуг:

- спрос со стороны ЛПРз на требуемые услуги;
- предложение со стороны ЛПРи на имеющиеся услуги.

3.2. Информационные потоки по финансированию услуг:

- спрос со стороны ЛПРи в форме цены за имеющиеся у него услуги и требуемые;
- предложение со стороны ЛПРз на оплату требуемых услуг.

3.3. Взаимодействия:

3.3.1. Прямые со стороны ЛПРи (действующее звено) на ЛПРз (воспринимающее звено), с помощью таких средств обслуживания, как психология;

3.3.2. Обратные, например реакция ЛПРз (воспринимающее звено) со стороны оператора на средство обслуживания (оператор), или на ЛПРи (действующее звено).

В соответствии с представленной на рис. 1 схемой, приведем пример описания функционирования основных компонентов обслуживаемых и обслуживающих систем.

Обслуживаемый субъект (ЛПРз), например, на правах собственника объекта обслуживания, будучи заинтересованным (отражение потребности) в изменении исходного состояния оператора, получает информацию, например в форме рекламы, от обслуживающего субъекта (ЛПРи), сравнивает свои возможности с потребностями и принимает решение. Принимаемое решение зависит от соотношения его потребностей и возможностей. При ограниченных возможностях ЛПРз может либо повысить их за счет увеличения доходов, либо снизить планку потребностей и привести их в соответствие с имеющимися возможностями. Иными словами, должен соблюдаться принцип баланса потребностей и возможностей. При удовлетворительном балансе возможностей и потребностей (кредит не рассматривается) ЛПРз принимает решение об открытии заказа на услугу или товар в форме договора, если он не в состоянии выполнить услугу сам (самообслуживание) или с его точки зрения это нецелесообразно.

Обслуживающий субъект (ЛПРи), заинтересованный в получении от потребителя оплаты за услуги и удержании рынка услуг в конкурентной среде, получает информацию от ЛПРз и других источников (например, в форме портфеля заказов, объемов продаж, реакций потребителей на оказываемые услуги и т.п.). Оценивая свои потребности (потенциально возможные доходы, прибыль) и возможности (издержки или затраты по развитию своей деятельности, например, по повышению качества услуг), ЛПРи, после сопоставления указанных факторов, принимает решение об удовлетворении заявки на услугу.

Для этого он на правах работодателя задействует необходимые средства обслуживания, включая человека-оператора как компонент эргономической системы. Конечное состояние объекта обслуживания оценивается исполнителем выходным контролем. Удовлетворение потребности ЛПРз и удержание потребительского рынка в конкурентной среде возможно, если услуги сопровождают объект обслуживания до его утилизации, обеспечивая необходимые гарантии работоспособности и качества. Таким образом, цикл заканчивается.

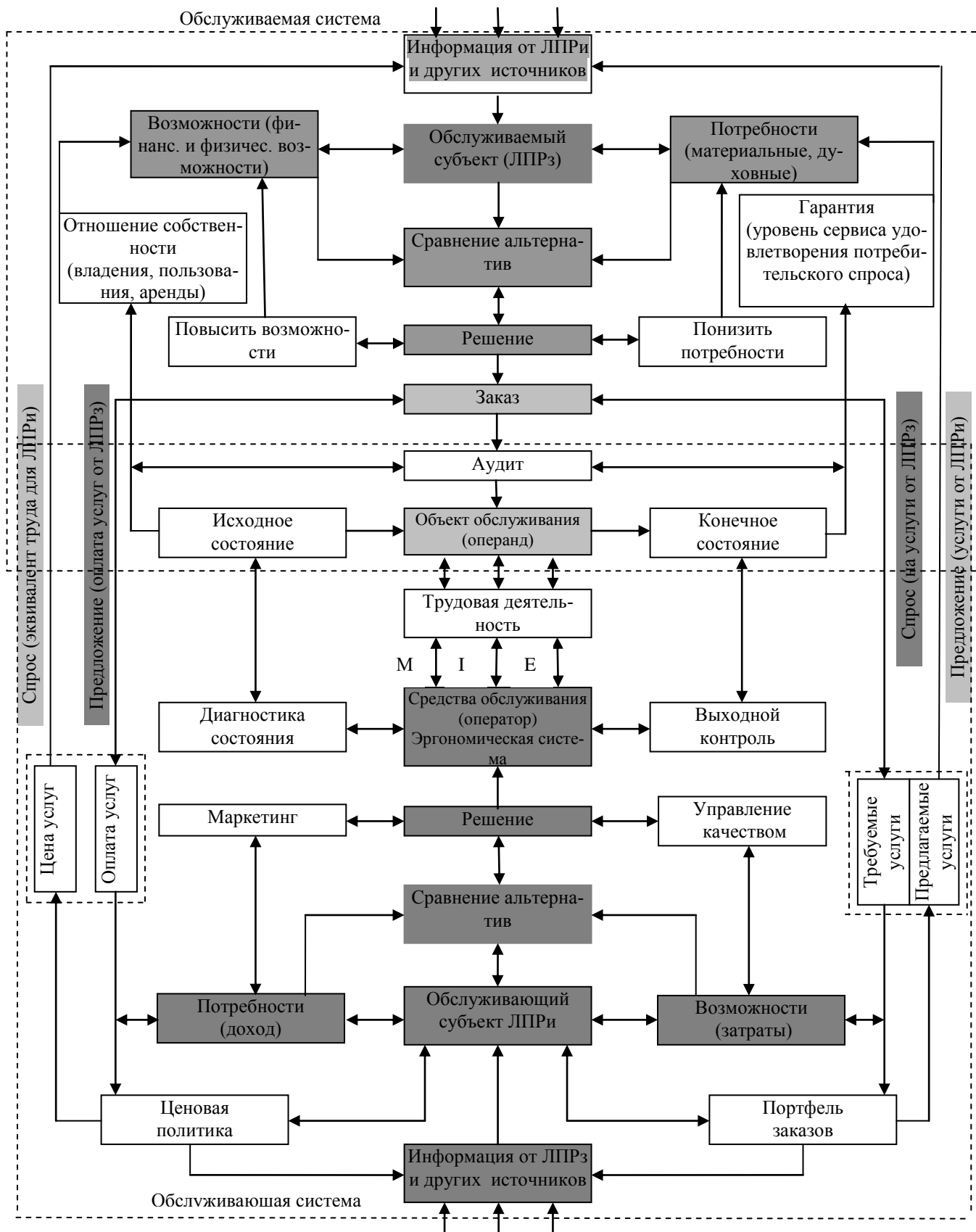


Рис. 1. Схема отношений субъектов – лиц, принимающих решение заказчика (ЛПРз) и исполнителя (ЛПРи) в сфере услуг

Встречным потокам (спрос), с одной стороны, и встречным потокам (предложение) - с другой, соответствуют удовлетворяемые в той или иной степени интересы ЛПРз и ЛПРи. Соотношения между интересами ЛПРз и ЛПРи могут быть различными и зависят, в частности, от соотношения цены и качества услуг (товара) [2].

Таким образом, рассмотренная схема отношений ЛПРз и ЛПРи представлена как цельно структурированная, которая имеет следующие особенности и свойства:

1. Общность названий функционально обусловленных компонентов обслуживаемой и обслуживающей систем (включая их встречные потоки спроса и предложения), существующих в единстве и с определенной полярностью интересов субъектов трудовой деятельности в сфере услуг.

2. Симметрия, однородность, подобие и баланс одноименных компонентов заинтересованных субъектов деятельности.

3. Взаимозависимость, взаимозаменяемость, обратимость и смена интересов ЛПР в зависимости от принадлежности одного и того же субъекта к статусу заказчика, или исполнителя услуг.

4. Стремление к устойчивому уровню зоны компромиссов ЛПРи и ЛПРз, которые аналитически можно интерпретировать с точки зрения функциональных уравнений, когда равна своему аргументу сама функция, и отождествлять как эволюционные, так и структурные характеристики системы взаимодействующих субъектов.

Библиографический список

1. Инженерная психология и эргономика современных социально-технических систем: учеб. пособие; под ред. Е.А. Зайцевой; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2012. – 177с.
2. **Егорова, Н.Е.** Автосервис. Модели и методы прогнозирования деятельности / Н.Е. Егорова, А.С. Мудунов. – М.: Экзамен, 2002. – 256 с.
3. **Половинкин, А.И.** Основы инженерного творчества: учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 204 с.
4. Количественная оценка условий и тяжести труда: методическая разработка по дисциплине "Эргономика и основы дизайна" для студентов направления подготовки 552900 и специальности 330500 / сост.: В.И. Дементьев, Т.А. Неделева; НГТУ. – Н.Новгород, 2004. – 36 с.
5. **Дементьев, В.И.** Антропологический аспект эргономической системы / сост. В.И. Дементьев; НГТУ. – Нижний Новгород, 2008. – 12 с.

Дата поступления
в редакцию 02.12.2013

V.I. Dementev, Yu.G. Kabaldin

SCHEMES SUBJECTS WORK IN SERVICE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Construction of whole-structured representation scheme functional components caused by employment in the services sector stakeholders, decision-makers.

Methodology: Isolation of functionally-related components based on the structure of the concept of need.

Findings: The paper presents a scheme of relations decision-makers, as whole-structured system with the properties of symmetry, similarity, interchangeability, reversibility and the pursuit of sustainable areas of compromise with the polarity of the subjects interested in to work.

Key words: subjects of employment, services, needs and opportunities, services and systems serving the customer and the provider of services, the operand, the ergonomic system, functional components caused by the relationship linkages and interactions.

УДК 621.78

В.В. Крайнов¹, Н.М. Тудакова¹, И.Н. Фролова²

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева¹
ОАО ПКО «Теплообменник»²

Рассмотрены вопросы технологии производства волноводной техники СВЧ и предложен новый вариант обработки волноводов методом электроплазменной обработки. Показан результат обработки электроплазменным способом, влияющим на КПД волновода.

Ключевые слова: СВЧ волновод, токонесущая поверхность, удельное сопротивление, шероховатость, коэффициент поглощения, электроплазменная обработка.

Наличие потерь в линии передач СВЧ-энергии при передаче высоких и средних мощностей приводит к разогреву линии, а при передаче весьма малых мощностей собственные шумы линии, обуславливающие потери, становятся соизмеримыми с полезным сигналом. Токи СВЧ во время передачи сосредоточены в поверхностных слоях проводника. Собственные потери устройств определяются свойствами поверхностного слоя металла, определяемого глубиной проникновения СВЧ-тока вследствие поверхностного эффекта. Потери энергии зависят от качества обработки рабочих поверхностей, т.е. от шероховатости поверхности. С уменьшением шероховатости токонесущей поверхности глубина проникновения СВЧ-тока уменьшается и становится соизмеримой с микронеровностями поверхности металла. В настоящее время существует тенденция к увеличению частоты СВЧ-тока с целью уменьшения массы изделий и увеличения КПД передающих устройств. Поэтому требования к качеству токопроводящей поверхности возрастают.

Волноводы СВЧ представляют собой металлическую трубу различного сечения (круглые, прямоугольного сечения, Н- и П-образные), с прикрепленными по краям фланцами. Продольное сечение волноводов также может быть различным в зависимости от назначения волноводного тракта. Длина каждой секции волноводного тракта зависит от серийности производства. На большие серии имеется возможность протягивать металл в необходимый профиль на значительную длину (4-6 м) и в дальнейшем резать его или состыковывать в зависимости от конструктивных особенностей волноводного тракта. Для малых серий волноводные секции изготавливают из пруткового металла подходящего диаметра, и длина секции, как правило, определяется возможностями инструмента, оборудования и технологии. В этом случае профиль волновода, как правило, круглый.

Для работы в сантиметровом и миллиметровом диапазоне в волноводе СВЧ работает тонкий слой внутренней поверхности. Токи СВЧ распространяются по внутренней поверхности волновода волнами, скачкообразно, врезаясь и отражаясь от поверхности волновода и, в зависимости от длины волны, проникают в поверхность на доли миллиметра. Каждый такой «скачок» несет потерю энергии, которая зависит от количества поперечных стыков данного волноводного тракта, или поперечных рисок на внутренней (рабочей) поверхности волновода. В этом случае происходит поглощение энергии СВЧ-тока.

Коэффициент поглощения энергии P поверхностью определяет одну из главных характеристик волновода - его КПД. Для данного чистого материала для каждой частоты рассчитывается теоретическое значение коэффициента поглощения $P_{\text{расчетное}}$. Это значение используется для сравнения с реальным значением коэффициента поглощения P конкретной поверхности и материала. Чем меньше поглощение у данной поверхности, чем ближе коэффициент поглощения P к расчетному значению $P_{\text{расчетное}}$, тем больше значение КПД.

Очень важными параметрами, влияющими на потерю энергии в рабочем поверхностном слое и на КПД волновода, являются:

- удельное сопротивление материала волновода;
- шероховатость поверхности.

Коэффициент поглощения электромагнитных волн поверхностью находится в прямой зависимости от удельного сопротивления материала: чем меньше удельное сопротивление, тем меньше поглощение, тем ниже коэффициент поглощения. Речь идет о сантиметровом и менее диапазоне волн. Поэтому исследование на коэффициент поглощения проводится на частоте 100-200 ГГц.

Для увеличения КПД для волноводов используют материалы с низким удельным сопротивлением (серебро, золото, медь, алюминий и их сплавы). Серебро и золото используют исключительно для покрытия внутренней рабочей поверхности из меди и алюминия и их сплавов. Это позволяет уменьшить потери при прохождении волновой энергии через волновод и предохраняет рабочую поверхность от окисления. Наиболее используемыми материалами для волноводов СВЧ являются алюминий и медь и их сплавы. Несмотря на высокие показатели алюминия по стоимости, весу и обрабатываемости, медь можно использовать в вакуумных конструкциях, что ставит ее на уровень универсальных материалов. Однако у меди имеются и недостатки, обусловленные ее свойствами. Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию примесей. Так, при содержании в меди 0,5% примесей цинка, кадмия и серебра, ее удельная проводимость снижается на 5%. При том же содержании никеля, олова или алюминия удельная проводимость меди падает на 25 – 40%. Еще более сильное влияние оказывают примеси бериллия, мышьяка, железа, кремния или фосфора, снижающие удельную проводимость на 55%. В то же время присадки металлов повышают механическую прочность и твердость меди. Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием оксидных и сульфидных пленок. Вследствие окисления медь непригодна для слаботочных контактов. Металлическое отслаивание и термическое разложение оксидной пленки вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах. Значительное влияние на механические свойства меди оказывает водород, легко проникающий вглубь металла при повышенных температурах. Давление образующегося в металле водяного пара из-за незначительной скорости его диффузии может достигать нескольких тысяч атмосфер. Это приводит к образованию микротрещин, нарушающих плотность материала и придающих ему хрупкость и ломкость. В производстве это явление называют водородной болезнью.

Как показывает практика, шероховатость рабочей (токонесущей) поверхности также значительно влияет на КПД волноводного элемента – чем ниже шероховатость, тем ниже коэффициент поглощения и выше КПД.

Для производства волноводов используются различные способы обработки, при которых получается различная шероховатость. В табл. 1 рассмотрены способы обработки медных и алюминиевых волноводов, которые при технологических особенностях (различные режимы резания, геометрии инструмента, технологической оснастки) дают сходные классы чистоты.

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод о том, что обработка наружных поверхностей проводится на один класс чище, чем обработка внутренних (сравнение точения и растачивания). В СТП предприятий, изготавливающих волноводную технику, для рабочих (токонесущих) поверхностей волновода чистота поверхности имеет требование по 7-8 классу. Изготовление более гладких (до Ra 0,2 мкм) внутренних цилиндрических поверхностей из меди и алюминия требует доводочных операций, что достаточно трудоемко и затратно в производстве. Поэтому поиск эффективных «объемных» технологий для достижения более высоких классов шероховатости для меди и алюминия является актуальным для многих производителей волноводной техники.

Одна из таких эффективных «объемных» технологий имеет все основания для эффективного использования в производстве волноводной техники СВЧ. Это электроплазменная обработка (ЭПО) металлов.

Сущность процесса электроплазменной обработки заключается в следующем. В электролитической ячейке при напряжении более 90 В вокруг активного электрода образуется парогазовая оболочка толщиной 10^{-5} м, через которую протекают электроразряды, обеспечивающие нагрев поверхности детали со скоростью до 500 град/с с максимальной удельной плотностью 10^3 - 10^4 Вт/см³.

Таблица 1

Классы чистоты для разных способов обработки медных и алюминиевых волноводов

Способ обработки		Класс чистоты с параметрами R _a (мкм)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,012	0,006
Литье по выплавляемым								x	x						
Литье под давлением										x	x				
Порошковая металлургия									x						
Сверление				x	x	x									
Строгание						x	x								
Точение	Чистовое						x	x							
	Тонкое								x						
Растачивание	Чистовое					x	x								
	Тонкое							x							
Развертывание	Чистовое						x	x							
	Тонкое								x						
Фрезерование	Чистовое				x	x									
	Тонкое						x	x							
Шлифование	Чистовое							x	x						
	Тонкое									x					
Протягивание	Чистовое							x	x						
	Тонкое									x	x				
Доработка твердым сплавом	Предвар.									x					
	Чистовая										x	x			
Суперфиниш	Чистовое									x	x				
	тонкое											x	x		
Анодно-механическая обработка	Предвар.						x								
	Чистовая							x	x						
Притирка											x	x	x		
Полирование													x		
Полирование химическое										x					
Точение алмазное													x		

Для тестирования электроплазменной установки (ЭПУ) по достижению шероховатости Ra 0,2 мкм для меди и алюминия были отобраны три материала: медь М3, алюминиевый сплав Д16Т, сталь 12Х18Н10Т (по 10 образцов каждого). Торцовые поверхности всех 10 образцов предварительно обрабатывались на токарном станке 16К20 до шероховатости Ra 0,8 мкм. Затем по пять образцов каждого материала были обработаны на электроплазменной установке.

Условия обработки на ЭПУ для всех образцов были одинаковые:

Рабочее напряжение (В)..... более 100
 Рабочая плотность тока (А/см³).....0,15 – 1,5
 Время обработки (мин).....1-10
 Удельные затраты энергии (кВт ч/дМЗ)....0,05 – 0,1
 Температура электролита..... 80-90°С
 Концентрация электролита..... до 60 г/л
 Электролит:.....раствор NaCl.

После ЭПО образцы имели разное качество обработанной поверхности. Эти данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Шероховатость Ra (мкм), образцов из разных материалов до и после ЭПО

№ п/п	Обрабатываемый материал	Удельное сопротивление, мкОм·м	Ra, мкм	
			до обработки на ЭПУ	после обработки на ЭПУ
1	МЗ	0,018	0,7-0,8	0,4-0,8
2	Д16Т	0,073	0,7-0,8	0,7-0,8
3	12Х18Н10Т	0,75	0,7-0,8	0,1-0,2

Образцы из стали 12Х18Н10Т, в отличие от медных и дюралевых, после обработки на ЭПУ имеют ярко выраженное повышение качества поверхности. Параметр шероховатости снижается 4–5 раз, а также стабилизируется получаемый профиль шероховатости. Указанные преимущества технологии ЭПО на этих образцах были полностью подтверждены.

Для образцов из сплава Д16Т влияние обработки на ЭПУ на качество поверхностного слоя не обнаружено, да и разница в шероховатости не позволяет сделать каких-либо выводов. Для сплава Д16Т требуется другой режим обработки.

Предварительные выводы: обработка на электроплазменной установке с высокой эффективностью осуществляется для обрабатываемого материала с достаточно высоким удельным сопротивлением (св. 0,1 мкОм·м). Поэтому в основном ЭПО применяется для железосодержащих сплавов.

Отклонением от известных закономерностей стали медные образцы. Медные образцы, имеющие до ЭПО равномерный характер следов обработки на плоскости, после ЭПО имели явно неравномерную шероховатость. Наблюдалось различное по глубине оплавление отдельных участков поверхности, наиболее глубокие следы оплавления – на периферии образцов. Расположение следов обработки по площади образца также стало неравномерным. Наиболее хаотичное расположение следов оплавления также наблюдалось на периферии образца.

Такая структура поверхности может быть объяснена тем, что во время обработки на ЭПУ происходит активное окисление меди. Из-за высокой электрической проводимости меди имеет место неравномерное распределение по поверхности образцов электроразрядных явлений (интенсивность электроразрядов снижается от периферии образца к середине).

Несмотря на неравномерность обработки поверхности на медных образцах, ЭПО для данного материала оказалась весьма эффективной.

Для принятия решения об использовании обработанных на ЭПУ материалов в волноводных конструкциях необходимо было проверить у данных материалов коэффициент поглощения поверхностью электромагнитных волн в момент «скачка» и отражения волны от поверхности металла. Исследование образцов на коэффициент поглощения проводилось на частоте 140 ГГц. Полученные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента поглощения поверхности до и после ЭПО

№	Материал	Удельное сопротивление, мкОм·м	Расчетное $P_{\text{расчетное}} (10^{-3})$	После станка $P (10^{-3})$	После станка + ЭПО $P (10^{-3})$
1	МЗ	0,018	1,00	1,23	1,11
2	Д16Т	0,073	1,46	2,30	2,30
3	12Х18Н10Т	0,75	6,70	8,00	7,00

Анализируя данные табл. 2 и 3, можно сделать вывод о зависимости коэффициента поглощения P от шероховатости поверхности Ra образцов: для материалов 12Х18Н10Т и Д16Т они логичны, а для МЗ получилось очень низкое значение коэффициента поглощения $P=1,11 \cdot 10^{-3}$ при грубом значении Ra .

Сравнение ЭПО по коэффициенту поглощения с другими методами обработки меди (см. табл. 1) дало следующий результат. Наиболее близкое значение с коэффициентом поглощения у ЭПО имеет обработка меди МЗ алмазным резцом: $P=1,10 \cdot 10^{-3}$. Однако, не смотря на практически одинаковые коэффициенты поглощения у ЭПО и обработки алмазным резцом ($P=1,11 \cdot 10^{-3}$ и $P=1,10 \cdot 10^{-3}$ соответственно), шероховатость образцов после ЭПО ($Ra0,4-0,8$) на несколько классов ниже, чем у образца, обработанного алмазным резцом ($Ra0,025-0,05$).

Таким образом, возникает вопрос о значительном уменьшении коэффициента поглощения у образцов из меди МЗ после ЭПО, в отличие от образцов из меди, обработанных другими методами.

Для более тщательного рассмотрения влияния ЭПО на качество поверхностного слоя для медных образцов был проведен анализ химического состава (табл. 4).

Таблица 4

Химический состав медных образцов из МЗ до и после ЭПО

№	Компонент	Концентрация до ЭПО, %	Концентрация после ЭПО, %
1	Cu	99,28996	99,44865
2	AL	0,54854	0,38509
3	Si	0,05213	0,03039
4	Fe	0,04439	0,03374
5	S	0,03122	0,04032

Некоторое отклонение по количеству примесей до и после применения ЭПО не может повлиять на значительное уменьшение коэффициента поглощения, так как медь с другим количеством примесей (M0, M1, M2) при аналогичной обработке имеет аналогичное значение коэффициента поглощения.

Ответ на вопрос об аномально низком коэффициенте поглощения у меди после ЭПО дает послойное исследование микроструктуры. В образцах после ЭПО в поверхностном слое материала (на глубине до 100 мкм), имеется значительное превышение содержания атомов натрия (Na) над атомами меди. До глубины поверхностного слоя образцов, равной значению шероховатости, количество атомов натрия в 10 раз превышает количество атомов меди, образуя защитную пленку. После достижения глубины поверхностного слоя образцов, равной значению шероховатости, на всем протяжении токонесущей поверхности количество атомов натрия сопоставимо с количеством атомов меди. Такая аномалия объясняется следующим образом. В момент электроразрядов из соляного раствора происходит выделение натрия не только на поверхность металла, но и внедрение его в поверхностный слой, при этом образуется металл-натриевый сплав (в данном случае, медно-натриевый). Проникая в кубическую

решетку меди, атом натрия, способствует созданию симметричной ионной решетки, а это приводит к снижению остаточного электрического сопротивления. Таким образом, твердый медный раствор, насыщенный натрием, в данном случае имеет более низкое, чем у чистой меди, удельное электрическое сопротивление.

Устойчивость твердого медного раствора, насыщенного натрием, полученного методом электроплазменной обработки была проверена при помощи метода отжига в водородной печи. Данный эксперимент выявил почти полное удаление натрия из поверхностного слоя медных образцов и возвращение коэффициента поглощения образца на уровень «после станка». Остальные образцы, которые не прошли отжиг в водородной печи, в течение нескольких лет не имели поверхностного окисления, сохраняя свои физические свойства, в том числе, коэффициент поглощения.

Выводы

Метод ЭПО материалов эффективен при использовании волноводов при нормальном атмосферном давлении и открытом (закрытом) пространстве.

Библиографический список

1. Арзамасов, Б.Н. *Материаловедение* / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макаров, Г.Г. Мухин. – 7-е изд. – М., 2005.
2. *Справочник по электротехническим материалам*; под ред. Ю.В.Корецкого [и др.]. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

V.V. Krainov¹, N.M. Tudakova¹, I.N Frolova²

PECULARITIES OF EMPLOYING ELECTRIC PLASMA TREATMENT

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
JSC «Теплообменик»²

Purpose: The issues of the current technology of producing Ultra High Frequency (UHF) waveguide equipment are addressed; new version of waveguide treatment by method of electric plasma treatment is suggested.

Design/methodology/approach: This method will help to treat simultaneously all the waveguide's surfaces within 1-10 minutes. Three different materials with the same roughness, which are used in the production of UHF waveguides, are chosen. After treatment of these materials at the electric plasma unit, the surface quality of all the materials turned out to be different.

Findings: Copper sample's absorption factor proved to be anomalous. It considerably extends beyond the limits of the dependences of absorption factor on specific resistance and roughness factor. The reason is saturation of metallic copper's lattice with metallic sodium to such amount that this allows to establish symmetric this between the copper molecules.

Originality/value: This saturation allows decreasing the specific resistance of copper's surface layer and create a copper protective layer (from oxidation by oxygen).

Key words: UHF- treatment, specific resistance, electric plasma treatment, absorption factor.

УДК 621.791.01

Б.П. Конищев¹, К.Б. Конищев²**РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАЛЕЙ
ПО ИХ ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва²

Приводятся расчеты теплофизических коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости, температуропроводности, поверхностной теплоотдачи, температуры ликвидус сталей, температурной зависимости теплофизических свойств удельного электросопротивления цветных металлов, полученные в результате линейной корреляции экспериментальных величин.

Ключевые слова: теплофизические коэффициенты, теплопроводность, объемная теплоёмкость, температуропроводность, поверхностная теплоотдача, температура ликвидус, удельное электросопротивление.

Быстрое развитие науки и техники последних десятилетий сопровождается постоянным и значительным ростом числа проблем, решение которых включает подробные исследования тепловых процессов при сварке. Наука о тепловых основах сварки рассматривает процессы распространения теплоты при нагреве металла различными источниками, влияние их на процессы плавления металла, а также на термический цикл и возникающие в шве и основном металле структурные и объёмные изменения.

Почти все существующие виды сварки основаны на местном концентрированном нагреве участков изделия до температур плавления или до пластичного состояния. Неправильный режим нагрева и охлаждения изделия в процессе сварки плавлением может стать причиной появления таких опасных дефектов сварки, как трещины, непровары, подрезы и др. Тепловое состояние металла, шлака и других компонентов, взаимодействующих в процессе образования сварного соединения, в значительной мере обуславливает характер, направление и скорость протекания всех физико-химических и металлургических процессов. Величина и характер деформаций и напряжений, возникающих в конструкциях при сварке, главным образом, зависит от цикла нагрева и охлаждения изделия, от характера температурных полей. Особенности распределения температур, скоростями отвода теплоты и охлаждения места сварки определяется структура металла шва и различных участков основного металла, прилегающих к шву. Кроме того, с тепловыми процессами связаны такие важнейшие характеристики сварки, как скорость нагрева металла, скорость расплавления, производительность сварки и её технико-экономическая эффективность.

Следовательно, без учёта теплового состояния металла нельзя достаточно глубоко объяснить большинство явлений, наблюдаемых при сварке. Чтобы определить характер протекания процессов сварки, необходимо знать распределение температур в теле и изменение его во времени в каждом отдельном случае. Поэтому, чтобы изучить сварочные процессы и научиться управлять ими, необходимо иметь представление о законах нагрева изделия и распространения в нём теплоты.

Для расчета температурных полей и температурных циклов сталей необходимо знание осредненных значений коэффициентов теплопроводности λ , объемной теплоемкости c и температуропроводности a (при температурах 500-600°C).

Для расчета тепловых процессов при сварке различных металлов принимаются осред-

ненные значения теплофизических коэффициентов: теплопроводности λ , объемной теплоемкости c , температуропроводности a , и полной поверхностной теплоотдачи α в диапазоне температур $T_{ср.}$, характерном для рассматриваемого процесса (табл. 1).

Таблица 1

Осредненные значения теплофизических коэффициентов

Металл	$T_{ср.}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/см К}$	$C\gamma, \text{Дж/см}^3\text{К}$	$a, \text{см}^2/\text{с}$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$
НУ и НЛ сталь	600	0,38-0,42	4,8-5,2	0,07-0,09	1500
ВЛ сталь (X)	600	0,25-0,27	4,4-4,6	0,05-0,07	1450
ВЛ сталь (ХН)	550	0,21-0,25	4,6-4,8	0,04-0,06	1400
Медь	400	3,7-3,8	3,9-4,0	0,94-0,97	1080
Бронза	370	1,1-1,3	3,4-3,6	0,3-0,4	900
Латунь	400	0,9-1,1	3,6-3,8	0,25-0,35	1000
Алюминий	300	2,6-2,7	2,7	0,96-1	660
Алюминиевый сплав	280	1,3-1,4	2,7	0,48-0,52	650
Титановый сплав	700	0,16-0,18	3,5-3,6	0,04-0,06	1650

Примечание: НУ - низкоуглеродистые стали: СтЗсп, 22К, 20, 25 и др.;

НЛ - низколегированные стали: 15Х, 15ХМ, 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2С...;

ВЛ(Х) - высоколегированные хромистые стали: 08Х13, 12Х13, 20Х13, 08Х18Т, 15Х25Т...;

ВЛ(Х) - высоколегированные хромоникелевые стали: 12Х18Н9, 17Х18Н9, 08Х22Н6Т...;

медь – М0, М1, М2, М3 и др.; латунь – Л63, Л68, Л90, Л659-1 и др.; бронза – БрА7, БрМц5, БрАД9-4 и др.; алюминий – А99, А85, А8, А7, АД0 и др.; алюминиевые – сплавы АМг3, АМг4, АМг5, АМц, АД20, АД30 и др.; титановые сплавы – ВТ5, ВТ20, АТ2, АТ3, ТС5 и др.

Большая номенклатура существующих и новых марок сталей не позволяет учесть зависимость теплофизических коэффициентов от их химического состава, хотя для многих углеродистых и легированных сталей в литературе имеются значения этих коэффициентов при различных температурах. Анализ этих данных показал, что значения теплофизических коэффициентов находится в тесной корреляционной зависимости от суммарной атомной доли легирующих элементов в стали:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n C_i/m_i,$$

где i – номер легирующего элемента в стали; n – количество легирующих элементов, C_i – массовая доля i -го элемента в стали; m_i – атомная масса i -го элемента.

Математическая обработка табличных данных (около 90 составов углеродистых и легированных сталей) позволила установить корреляционные зависимости коэффициентов a и λ от суммарной доли σ при температурах 500-600 °С:

$$a = a_0 + a_1 a^x, \quad \lambda = b_0 + b_1 b^y, \quad c\gamma = c_0 + c_1 c^z,$$

где $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ - коэффициенты регрессии; x, y, z – показатели степени.

Рассчитанные по этим уравнениям значения коэффициентов α и λ в сравнении с их табличными (экспериментальными) значениями приведены в (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные и табличные значения коэффициентов λ и a

Сталь	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/смК}$		$a \cdot 10^3, \text{см}^2/\text{с}$	
	расчетное	табличное	расчетное	табличное
8	413	402	73	73
20	394	393	71	72
40	386	381	70	69
У8	363	352	69	64
У12	340	347	67	67
30Х	348	356	69	67
30Г2	364	372	70	69
12ХН3	317	314	71	72
30ХН3	298	308	66	63
10Х13	283	272	61	59
30Х13	276	272	60	58
20Х28	212	243	51	52
08Х18Н9	209	217	52	54
120Г13Л	214	205	49	40

Для конкретной марки стали осредненные значения теплофизических коэффициентов можно рассчитать в зависимости от содержания легирующих элементов по следующим уравнениям:

$$\sigma = \frac{1}{4} \left\{ \frac{1}{3} \left[C + \frac{1}{5} \left(Ni + Co + Cu + \frac{W}{3} \right) \right] + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24} \right\},$$

$$\lambda = \frac{1}{20} (11 - 7 \cdot \sqrt[4]{\sigma}), \quad c\gamma = \frac{1}{10} (55 - 9 \cdot \sqrt[4]{\sigma}), \quad a = \frac{\lambda}{c\gamma}.$$

Температура плавления сталей определяется температурой ликвидус $T_{л}$. Учитывая правило аддитивности влияния легирующих элементов на температуру ликвидус стали, можно получить следующую зависимость:

$$T_{л} = 5[4(77 - 3C) - Mn] - 0,5(13\sqrt{Cr} + 25\sqrt{Ni}) - 2(4Si + Mo + V + Co + Al + 3Cu + 7Ti + 9Nb) - 13Zr.$$

Если принять, что $T_{ср} \approx 0,4 \cdot T_{л}$, то коэффициент полной поверхностной теплоотдачи α можно рассчитать по уравнению

$$\alpha = \left(\frac{1}{37} + \frac{T_{л}}{28500} \right)^2.$$

Эти расчеты успешно используются студентами при выполнении курсовой работы по дисциплине «Физико-математические основы сварочных процессов». Например, для трубной стали 10Г2ФБЮ, содержащей 0,12% С, 1,75% Мn, 0,5% Si, 0,3% Cr, 0,3% Ni, 0,3% Cu, 0,12%

V, 0,05%Nb, 0,05%Al, 0,035% Ti, получены значения: $\lambda=0,365$ Вт/смК, $c\gamma=5,024$ Дж/см³К, $a=0,0726$ см²/с, $T_{л}=1506$ °С.

Важнейшими теплофизическими характеристиками, определяющими закономерность поведения цветных металлов при сварке, являются объемная теплоемкость $c\gamma$, теплопроводность λ , температуропроводность a , удельное электросопротивление ρ . Коэффициент теплопроводности λ определяет количество теплоты в Дж, которое проходит в 1 с через площадь поперечного сечения металла 1 см² при градиенте (перепаде температур) 1 К/см. Объемная теплоемкость $c\gamma$ определяет количество теплоты (Дж), которое необходимо для нагревания 1 см² металла на 1 К. Коэффициент температуропроводности a выражает скорость выравнивания

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$$

температуры и связан с предыдущими коэффициентами соотношением

Знание их температурной зависимости необходимо для решения задач, связанных с оптимизацией технологии сварки цветных металлов в микроэлектронике, ядерной энергетике и других современных отраслях промышленности.

Нелинейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов учитывается только при численных методах расчета. Поэтому предпочтение следует отдать более простым линейным зависимостям, которые можно использовать не только при численных, но и при аналитических методах расчета. В табл. 3 представлены результаты математической обработки справочных данных по теплофизическим свойствам металлов, применяемых при сварке изделий электронной техники.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции и регрессии теплофизических коэффициентов цветных металлов

Металл ΔT , К	Коэффициенты	λ , Вт/смК	$c\gamma$, Дж/см ³ К	a , см ² /с	ρ , мкОм·см
1	2	3	4	5	6
Медь (300-1357)	b_0 $b \cdot 10^4$	4,249 -7,916	3,147 8,049	1,277 -3,947	-0,91 79,462
	r	-0,0998	0,97	0,997	0,998
Серебро (300-1235)	b_0 $b \cdot 10^4$	4,592 -8,082	2,291 4,952	1,936 -5,697	-0,741 72,473
	r	0,99	0,995	-0,997	0,998
Золото (300-1337)	b_0 $b \cdot 10^4$	3,338 -6,284	2,269 5,153	1,397 -4,096	-1,419 107,18
	r	0,992	0,942	0,999	0,997
Бериллий (300-1400)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,997 -10,4	3,144 22,7	0,54 -3,55	-7,586 352,1
	r	-0,934	0,969	-0,876	0,9984
Магний (300-923)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,635 -2,59	1,616 5,677	0,974 -3,579	-0,362 164,120
	r	-0,998	0,999	-0,999	0,999
Цинк (300-692)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,259 -3,755	2,484 9,146	0,488 2,436	-1,914 253,41
	r	-0,993	9,946	-0,999	0,999
Алюминий (300-933)	b_0 $b \cdot 10^4$	2,885 -5,151	2,056 11,943	1,097 4,452	-1,077 122,47
	r	-0,965	0,997	-0,992	0,999
Олово (303-505)	b_0 $b \cdot 10^4$	0,735 -3,026	1,343 10,685	0,518 -3,96	-5,439 525,22

	r	-0,989	0,999	-0,996	0,999
Свинец	b_0	0,387	1,324	0,284	-5,531

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
(300-600)	$b \cdot 10^4$	1,184	4,148	1,387	887,5
	r	-0,999	0,998	-0,999	0,996
Гафний	b_0	23	1,73	12,6	-0,2
(300-1300)	$b \cdot 10^4$	-20	5,2	-28	127
	r	-0,794	0,998	-0,928	0,993
Вольфрам	b_0	1,7	2,3	0,68	-8,84
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	-4,8	6	-2,5	344
	r	-0,943	0,978	-0,964	0,998
Палладий	b_0	0,67	2,7	0,24	6,5
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	1,5	6	0,12	240
	r	0,992	0,983	0,992	0,992
Платина	b_0	0,64	2,7	0,24	1,9
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	1,7	4,7	0,15	330
	r	0,96	0,999	0,673	0,998
Никель	b_0	1,17	2,2	0,14	-1,2
(300-430)	$b \cdot 10^4$	-9,3	53	-3,7	620
	r	0,996	0,949	-0,995	0,994
Никель	b_0	0,49	4,9	0,11	12,5
(630-1722)	$b \cdot 10^4$	1,8	0,58	0,32	28
	r	0,943	0,784	0,741	0,99

Во всех случаях использовалась линейная корреляция $K = b_0 + bT$, где T - температура; b_0 и b – коэффициенты регрессии; K - теплофизические коэффициенты (объемная теплоемкость c_v , теплопроводность λ , температуропроводность a , удельное электросопротивление ρ). Для оценки степени линейности полученной зависимости в таблице приводятся значения коэффициентов корреляции.

В широком диапазоне температур (от нормальной до плавления) получены наиболее высокие значения коэффициентов корреляции для непереходных металлов (медь, серебро, золото, магний, цинк, алюминий, олово, свинец), кроме бериллия. Эти металлы не имеют структурных и магнитных превращений в твердом состоянии, поэтому высокая линейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов сохраняется до температуры плавления. Более высокая электро- и теплопроводность этих металлов по сравнению с другими обеспечивается их электронной составляющей (около 99%). Доли фоновой, магнитной и других составляющих в тепло- и электросопротивлении этих металлов незначительна.

Бериллий, в отличие от других непереходных металлов, имеет две кристаллические модификации (α , β). Сведения о свойствах бериллия, стабильного лишь в узком интервале ($T=1550$ К, $T=1560$ К), немногочисленны и противоречивы. Поэтому для бериллия получены линейные корреляционные зависимости лишь до температуры 1400 К.

В парамагнитных переходных металлах (гафний, вольфрам, палладий, платина) возрастает доля фоновой и магнитной составляющих и существенно нарушается линейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов.

Для этих металлов удалось получить линейные температурные зависимости с высокими коэффициентами корреляции только до температур, значительно меньших, чем их температуры плавления (для гафния – до 1300 К, а для вольфрама, палладия и платины –

до 1400 К). Для более высоких температур также получены линейные зависимости, но с другими коэффициентами регрессии.

В ферромагнитных переходных металлах (никель, кобальт, железо) значительно возрастает доля магнитной составляющей. В точке Кюри наблюдается ярко выраженный максимум температурного коэффициента электросопротивления и объемной теплоемкости. Для теплопроводности этих металлов в точке Кюри имеется хорошо выраженный минимум. Поэтому линейные температурные зависимости теплофизических свойств никеля определялись для двух интервалов температур.

$$\Delta T = 300 \dots 630 \text{ К}, \quad \Delta T = 630 \dots 1728 \text{ К},$$

$$\rho = 1,2 + 6,2 \cdot 10^{-2} T, \quad \rho = 12,5 + 2,8 \cdot 10^{-3} T,$$

$$\lambda = 1,17 - 9,3 \cdot 10^{-4} T, \quad \lambda = 0,49 + 1,8 \cdot 10^{-4} T,$$

$$a = 0,34 + 3,7 \cdot 10^{-4} T, \quad a = 0,11 + 3,2 \cdot 10^{-5} T,$$

$$c\gamma = 2,2 + 5,3 \cdot 10^{-4} T \quad c\gamma = 4,9 + 5,8 \cdot 10^{-5} T.$$

Библиографический список

1. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. **Зиновьев, В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1980. – 384 с.
4. **Конищев, Б.П.** Расшифровка буквенных обозначений в маркировке сталей и сварочных материалов / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Проблемы сварки и прикладной электроники: материалы междунар. научно-технич. конф. «XI Бенардовские чтения» - Иваново: ИГЭУ, 2003. С 88–92.
5. **Конищев, Б.П.** Эпсилон-критерии для выбора расчетной схемы тепловых процессов сварки / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Сварка и контроль – 2004: сб. докл. Всероссийской с международным участием научно-технич. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Н. Г. Славянова. – Пермь, 2004. Т. 2. С. 217–218.

Дата поступления
в редакцию 02.12.2013

В.Р. Konishchev¹, К.В. Konishchev²

CALCULATION OF STEEL THERMAL COEFFICIENTS ACCORDING TO THEIR CHEMICAL COMPOSITION AND THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE NON-FERROUS METAL THERMOPHYSICAL PROPERTIES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
«Gazprom VNIIGAZ LLC», Moscow²

Purpose: To find mathematical dependency of thermal coefficients from chemical composition of steel and thermal properties of non-ferrous metals.

Methodology: Mathematical calculation of shared data, linear correlation.

Findings: The result equations were used to calculate thermal cycles and temperature fields for welding.

Key words: thermal constant, thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermal diffusivity, surface convective heat transfer, fusion temperature, specific electrical resistance.

УДК 681.5

Е.А. Куликова, Т.Н. Гребнева

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ ТИПА ОЦ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена методика формализации проектирования маршрута на примере корпусной детали на основе принципов модульной технологии и графов размерных связей.

Ключевые слова: модуль поверхностей, модуль обработки, граф размерных связей, информационная геометрическая модель детали, этапы обработки, базирующий модуль.

Недостаточность формального представления теоретических положений технологии машиностроения ясно обозначилась в ходе создания систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП). Преимущественное развитие получили системы, где проектирование осуществлялось на основе унифицированных (типовых или групповых) технологических процессов или их фрагментов. Методы проектирования были построены на поиске именно таких процессов и соответствующей их доработки.

Более универсальным является метод синтеза, предназначенный для проектирования технологических процессов на детали и сборочные единицы для любых изделий. В основе метода лежит положение о том, что процесс проектирования технологических процессов является многоуровневым и итерационным. Разработка теоретических основ, методик и программных продуктов синтеза проектных решений – актуальная задача, решение которой даст возможность повысить производительность труда в сфере подготовки производства корпусных деталей машин, а также повысить качество проектирования технологических процессов их изготовления.

В настоящей работе предлагаются структурные модели и методика синтеза технологического маршрута обработки на примере корпусной детали на станках типа обрабатывающий центр.

Синтез маршрута обработки детали включает следующие этапы:

- 1) анализ конструкторской информации, выделение и классификация поверхностей детали;
- 2) назначение методов и видов обработки поверхностей и распределение полученного набора переходов по этапам обработки;
- 3) выбор комплектов технологических баз для каждого технологического этапа и определение последовательности выполнения переходов внутри этапа.

Анализ и преобразование конструкторской информации

На первом этапе – анализ конструкторской информации – в соответствии с концепцией модульной технологии, предполагается выделение комплектов элементарных поверхностей, объединенных единым функциональным назначением, – модулей поверхностей (МП). На основании анализа чертежа детали и технической документации устанавливается служебное назначение каждой поверхности детали, которые затем объединяются в соответствующие МП [1]. Модуль поверхностей – это сочетание поверхностей, с помощью которого деталь выполняет соответствующую служебную функцию. Отличительной особенностью МП является то, что сочетание поверхностей, образующих модуль, не случайно, а является

необходимым для выполнения соответствующей функции. Отсюда вытекает главное достоинство МП - однозначность его формирования из числа поверхностей детали. По этому признаку любой грамотный конструктор или технолог безошибочно определит у любой детали модули поверхностей, из которых она состоит. Все МП делятся по служебному назначению на три класса [1]: четырнадцать базисных (МПБ); шесть рабочих (МНР) и шесть связующих (МПС). С помощью МПБ деталь базируется в машине или механизме, с помощью МНР деталь выполняет ту или иную рабочую функцию, например, передает крутящий момент, и с помощью МПС базисные и рабочие модули связываются в единое пространственное тело, образуя деталь.

Обозначение модуля включает букву, указывающую его вид, и цифры, обозначающие конструктивную разновидность модуля данного вида.

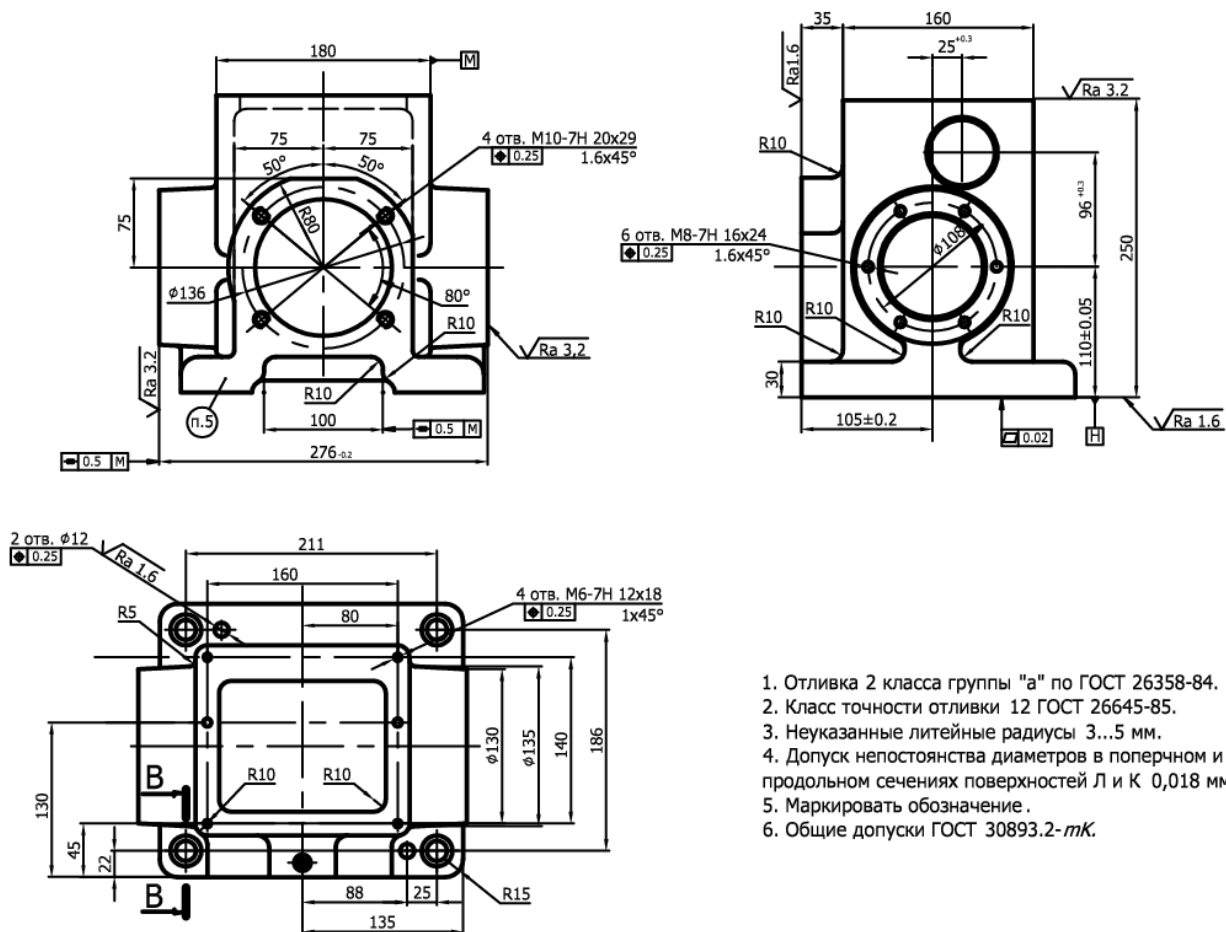


Рис. 1. Чертеж детали

Анализ особенностей обработки корпусных деталей показал, что к предложенной классификации модулей необходимо добавить понятие «крепежный» модуль (К), то есть сочетание неосновных поверхностей, обработка которых производится за один установ на одном этапе.

Информационная геометрическая модель (ИГМД) детали представляет собой эскиз детали, на котором показан ее контур с обозначением обрабатываемых МП и необрабатываемых, связанных с первыми размерами (рис. 2), граф размерных связей (рис. 3) и таблица-спецификация, в которой приводится перечень МП, составляющих деталь, МП конструкторских баз и шесть координирующих размеров, определяющих положение остальных МП (рис. 4).

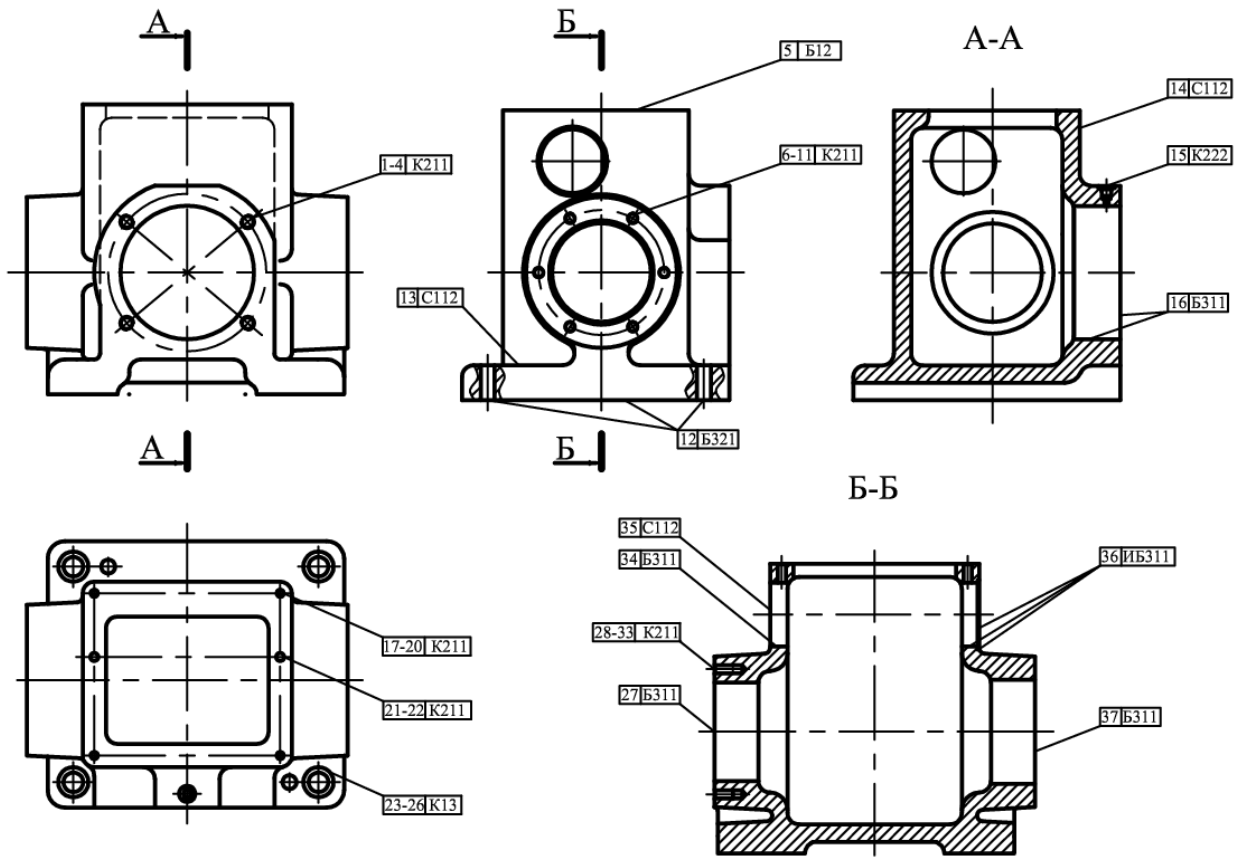


Рис. 2. Эскиз детали с нумерацией и обозначением кодов поверхностей

Построение конструкторского графа МП начинается с базирующего МП, выступающего в роли комплекта основных баз детали, которым является 12Б321, образованный плоскостью основания корпуса и двумя цилиндрическими отверстиями. На втором уровне размещаются МП, базой которых является МП12Б321. На третьем уровне размещаются МП, базой которых являются МП второго уровня, и т.д. до последнего МП. Каждый модуль поверхностей должен иметь свою координатную систему, ориентированную определенным образом относительно его поверхностей. В зависимости от положения МП на детали проекции осей его координатной системы относительно проекций чертежа детали могут занимать различное положение. Чтобы однозначно определить взаимное расположение МП относительно друг друга, координатную ось Z всегда совмещаем с осью отверстия (если отверстие отсутствует, то перпендикулярно плоскости XY), φ , ψ , θ определяют углы поворота вокруг осей оси OX , OY и оси OZ соответственно.

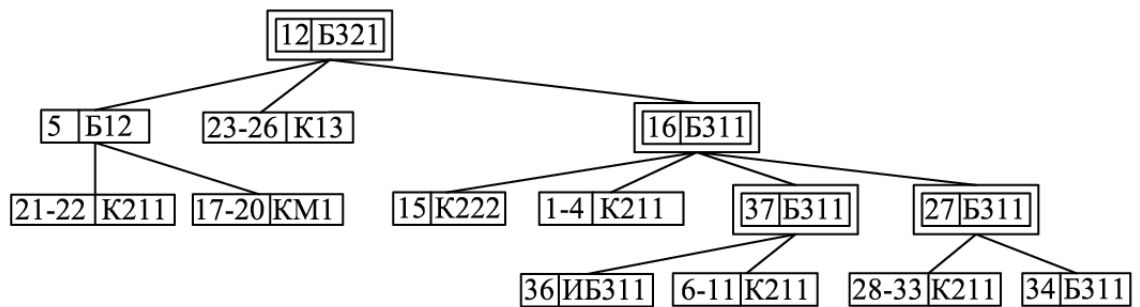


Рис. 3. Конструкторский граф

Таблица

Таблица-спецификация 1

№ и обозначение МП	Базовые МП	Настроечные базы	Параметры относительного положения МП					
			X, мм	Y, мм	Z, мм	φ°	ψ°	θ°
1-4К211	12Б321	16Б311	0	$\emptyset 136/2$	$\emptyset 136/2$	50	-	-
5 Б12	16Б311	12Б321	-	-	250	-	-	90
6-11К211	12Б321	31Б311	$\emptyset 108/2$	0	$\emptyset 108/2$	-	60	-
12Б321	16Б311		22	88	$110\pm 0,05$	-	-	90
13С112		12Б321	-	-	30	-	-	-
14С112		16Б311	35	-	-	-	-	-
15К222	16Б311		12	-	75	-	-	90
16Б311	12Б321		22	88	$110\pm 0,05$	-	-	90
17 К211	16Б311		45	80	-	-	-	90
18 К211	16Б311	17 К211	0	160	0	-	-	-
19 К211	16Б311	18 К211	140	0	0	-	-	-
20 К211	16Б311	19 К211	0	160	0	-	-	-
21 К211	16Б311		130	80	0	-	-	90
22 К211	16Б311	21К211	0	160	0	-	-	-
23К13	16Б311		0	25	$14\pm 0,5$	-	-	-
24К13	16Б311	23К13	0	211	0	-	-	-
25К13	16Б311	24К13	186	0	0	-	-	-
26К13	16Б311	25К13	0	211	0	-	-	-
27Б311	12Б321	16Б311	$105\pm 0,2$	$276/2$	0	-	-	90
28-33К211	12Б321	27Б311	$\emptyset 108/2$	0	$\emptyset 108/2$	-	60	-
34Б311	12Б321	27Б311	$25^{+0,3}$		$96^{+0,3}$	-	-	-
35С112		16Б311	-	90	-	-	-	-
36ИБ311	12Б321	37Б311	$25^{+0,3}$	$50^{+0,5}$	$96^{+0,3}$	-	-	-
37Б311	12Б321	16Б311	$105\pm 0,2$	$276/2$	0	-	-	90

Формирование маршрута обработки МП

Данный этап включает в себя назначение модулей обработки (МО) для каждого МП, определение количества этапов обработки детали и распределение переходов МО по этапам.

Исходя из принципов модульной технологии каждому МП должен соответствовать свой модуль обработки (МО). Выбор конкретного МО зависит от конструкторско-технологических характеристик МП. Для формализации данного решения можно использовать алгоритмические таблицы. Пример алгоритмической таблицы выбора МО для МП К1 представлен в табл. 2, совокупность переходов по обработке МП – в табл. 3.

В алгоритмической таблице приняты специальные обозначения. Стандартный адрес перехода обозначен символом «.». Метка 10 является меткой подпрограммы, на которую производится выход из таблицы, если исходные данные не вписываются в предусмотренные интервалы условий применимости. Символ «—» означает безусловный переход к следующему столбцу данной строки. Если элемент таблицы $r_{i+1,j}x_{i+1,j}(a_{i+1,j})$ полностью совпадает с элементом $r_{ij}x_{ij}(a_{ij})$, стоящим в данном столбце строкой выше, вместо элемента $r_{i+1,j}x_{i+1,j}(a_{i+1,j})$ ставится символ «.».

С помощью табл. 3 определим МО для модулей К13.

Множество исходных данных запишется следующим образом:

$$U = \{K1, D_{\text{отв}}, IT, \text{допуск}\} = \{3, 17, 13, 0.25\}.$$

Обозначим через элемент таблицы. Тогда схема поиска:

$$a_{11} \rightarrow a_{91} \rightarrow a_{161} \rightarrow a_{162} \rightarrow a_{172} \rightarrow a_{173} \rightarrow a_{174} \rightarrow a_{185} \rightarrow \{13\}.$$

Итак, модулям 23-26К13 соответствует МО13.

Таблица 2

Алгоритмическая таблица выбора МО для модуля К1

№ по порядку	Вид модуля К1	D _{отв}	Квалитет (IT)	Допуск	МО
1	1 (9.1)	6 .	8 (6.3)	1.0 (10)	1
2	—	10 .	8 (6.3)	.	2
3	—	15 .	8 (6.3)	.	3
4	—	30 (10)	8 (7.3)	0.2 .	4
5	—	.	.	1.0 (10)	5
6	—	.	14 (10)	0.2 (8.5)	6
7	—	.	.	.	7
8	—	.	.	1.0 (10)	8
9	2(16.1)	6 .	8 (14.3)	1.0 (10)	1
10	—	10 .	8 (14.3)	.	2
11	—	15 .	8 (14.3)	.	3
12	—	30 (10)	8 (14.3)	0.2 .	9
13	—	.	.	1.0 (10)	10
14	—	.	14 (10)	0.2 .	6
15	—	.	.	1.0 (10)	11
16	3 (10)	15 .	14 (10)	.	12
17	—	30 (10)	.	0.2 .	12
18	—	.	.	1.0 (10)	13

Таблица 3

Состав МО для модуля К1

№ МО	Переходы обработки отверстий, выполняемые инструментом				
	ЦЕНТР	СВ	РЗВР		
1	ЦЕНТР	СВ	РЗВР		
2	ЦЕНТР	СВ	РЗВР	РЗВР	
3	ЦЕНТР	СВ	ЗНКР	РЗВР	РЗВР
4	ЦЕНТР	СВ	ЗНКР	ФАСКА	РЗВР
5	СВ	ЗНКР	ФАСКА	РЗВР	РЗВР
6	ЦЕНТР	СВ			
7	ЦЕНТР	СВ	ФАСКА		
8	СВ	ФАСКА			
9	ЦЕНТР	СВ	ЗНКР	РЗВР	
10	СВ	ЗНКР	РЗВР	РЗВР	
11	СВ				
12	ЦЕНТР	СВ	ЦЕКВ		
13	СВ	ЦЕКВ			

Примечание: ЦЕНТР – центрование; СВ – сверление; ЗНКР – зенкерование; РЗВР – развертывание; Ф – обработка фаски; ЦЕКВ – цекование.

Подобные крепежные модули относятся к неосновным поверхностям и выполняются, как правило, на последнем этапе обработки с данной стороны детали. Обработка основных поверхностей, образующих МП, может производиться за различное количество этапов, и здесь целесообразно производить назначение элементарных модулей обработки (ЭМО) отдельно для основных отверстий и плоскостей, с параллельным их группированием по этапам в соответствии с алгоритмом (рис. 4).

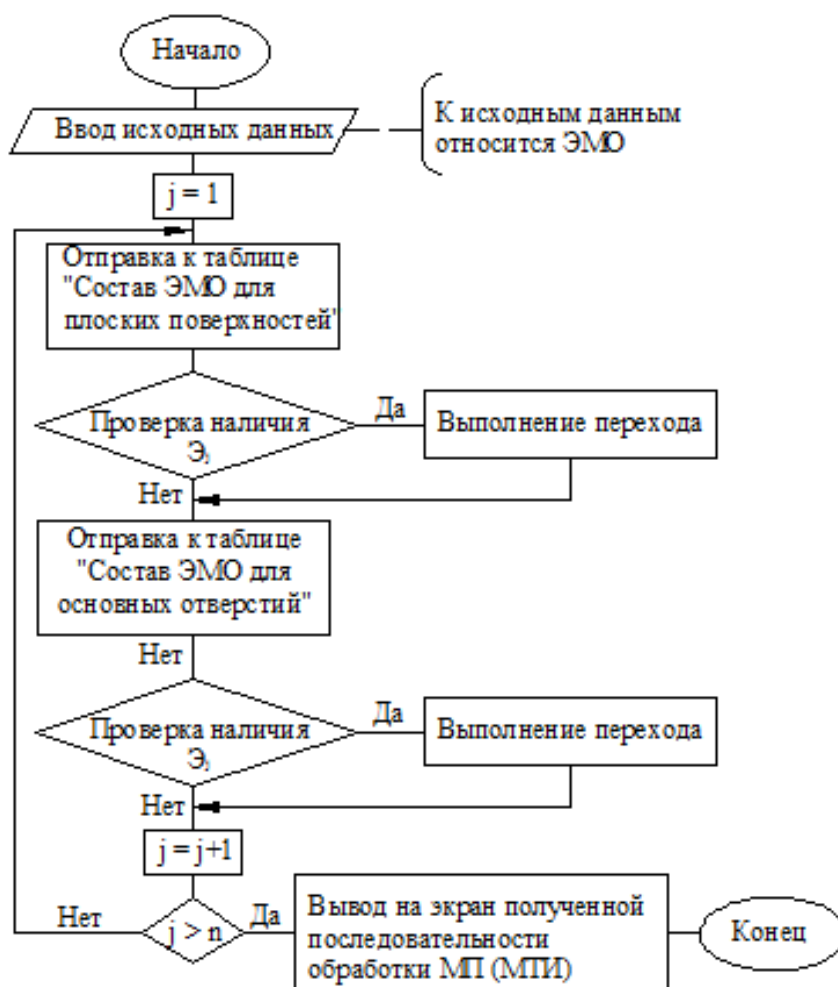


Рис. 4 . Алгоритм формирования интегрального технологического модуля для обработки MPI основных поверхностей

Формализация определения комплектов баз по этапам обработки

При построении ТП сначала выбирают модули технологические базовые (МТБ) для получения каждого MPI детали. Исходными данными для этой задачи служит граф размерных связей MPI детали. Граф строится для каждой из координатных осей. На графах исходные MPI, формообразование которых завершилось в процессе изготовления заготовки, отмечены овалом; MPI, которые являются конструкторскими базами, обведены двоянной линией. MPI, получаемые на рассматриваемой операции и операции обработки на предыдущем этапе – одной линией; пунктирной линией отмечены модули, отсутствующие в начале этапа и появляющиеся в результате его реализации. На лучах графа указываются координирующие размеры (рис. 5). Из графа размерных связей видно, что у нас есть четыре конструкторские базы (обведены двойной линией), поэтому технологические базы будем выбирать из них. Из конструкторского графа видно, что комплектом основных баз детали является модуль 12Б321 (находится в вершине графа), поэтому на этапе подготовки баз мы будем обрабатывать этот модуль и модули, которые связаны с ним размером и получение которых возможно при том же креплении заготовки.

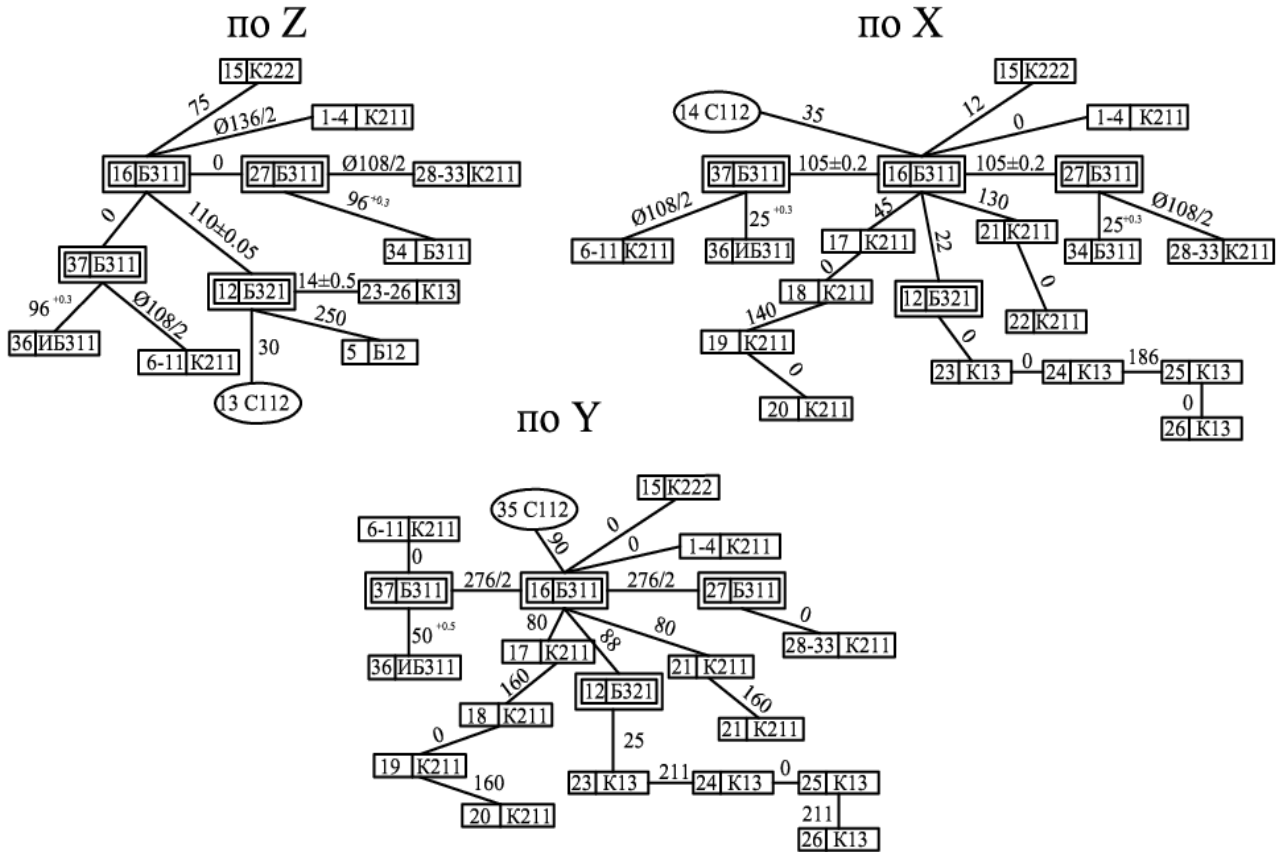


Рис. 5. Граф размерных связей модулей поверхностей детали

В качестве технологических баз на первой операции назначаются исходные (необрабатываемые на этом этапе, но обработанные на предыдущем) модули. На графах они имеют одну связь с обрабатываемыми поверхностями.

Как было отмечено, на подготовительном этапе мы обрабатываем модуль 12B321 и модули, получение которых возможно при том же креплении заготовки и которые связаны с этим модулем размерными связями.

Из графов (слайд) видно, что модуль 12B321 связан размером только с одной конструкторской базой (модуль 16B311). Так как модуль 16B311 является неполным комплектом баз, то для лишения заготовки всех степеней свободы необходимо выбрать еще один модуль. Следуя рекомендациям, выбираем необрабатываемый модуль, связанный размером с модулем 12B321. Это модуль 13C112.

При определении возможности обработки модулей группы следует использовать понятие настроечная база. Настроечная база используется в случаях, когда с одного установка требуется обработать несколько модулей, связанных размерами и (или) относительными поворотами. Один из них связан размером (относительным поворотом) с технологической базой. Именно этот модуль будет для другого обрабатываемого модуля настроечной базой.

Так как обработка ведется на ОЦ с горизонтальным шпинделем и поворотным столом, то, проанализировав графы и таблицу-спецификацию, где указано взаимное расположение модулей, можно сделать вывод, что на первой операции могут обрабатываться следующие модули: 12B321, 5B12 (модуль 12B321 является настроечной базой для модуля 5B12), причем за две позиции.

Для реализации определения порядка смены баз строятся графы размерных связей МП и проводится их анализ для всех этапов обработки.

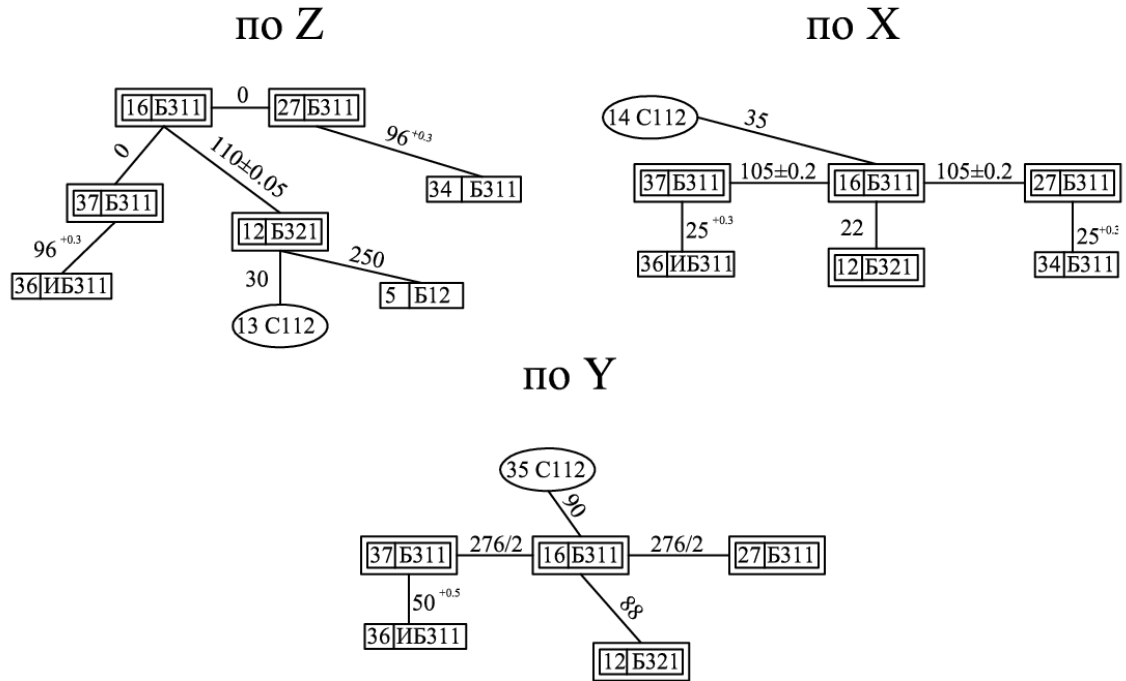


Рис. 6. Граф размерных связей МП на этапе подготовки баз

На черновом этапе комплектом технологических баз является модуль 12Б321, который был обработан на предыдущем этапе. Так как был задан ОЦ с поворотным столом, то все модули, присутствующие на рис. 6, могут быть обработаны с одного установа (за три позиции) от одного МТБ. Группы обрабатываемых модулей:

- 1) 16Б311;
- 2) 27Б311 (модуль 16Б311 является настроечной базой), 34Б311(настроечной базой будет 27Б311);
- 3) 37Б311 (16Б311будет настроечной базой) , 36ИБ311 (настроечной базой будет 37Б311). Аналогично производится выбор баз для последующих этапов обработки (рис. 7-9).

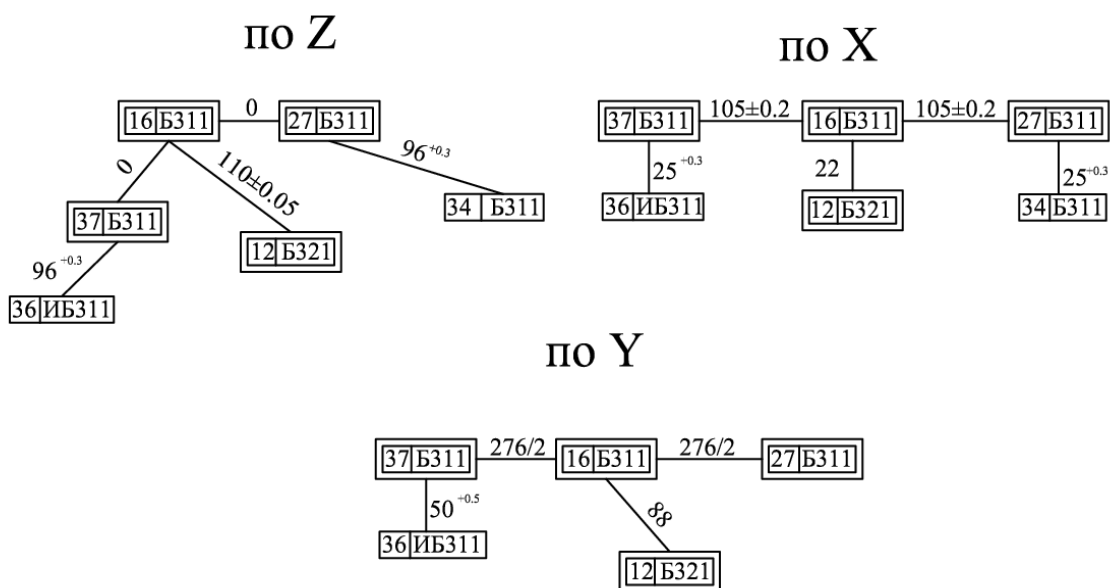


Рис. 7. Граф размерных связей МП на черновом этапе

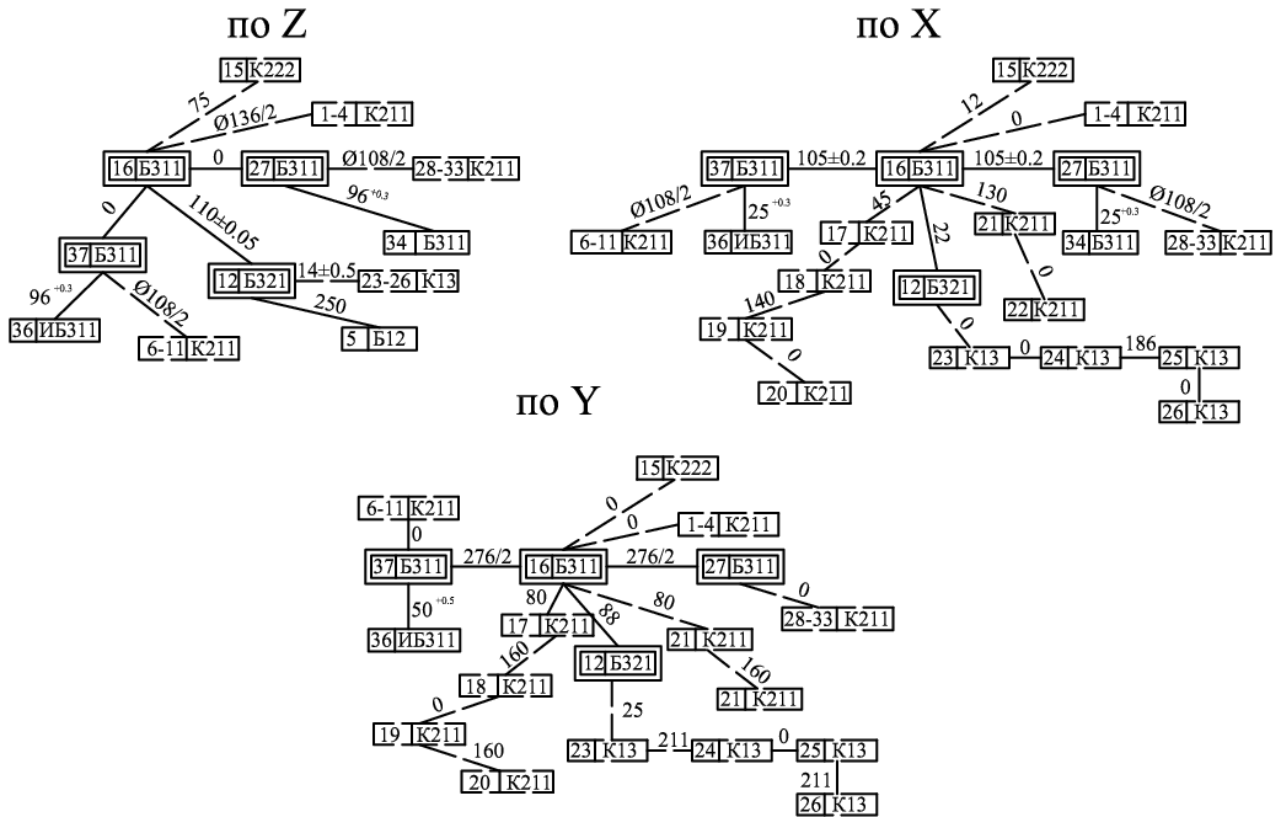


Рис. 8. Граф размерных связей МП на чистовом этапе

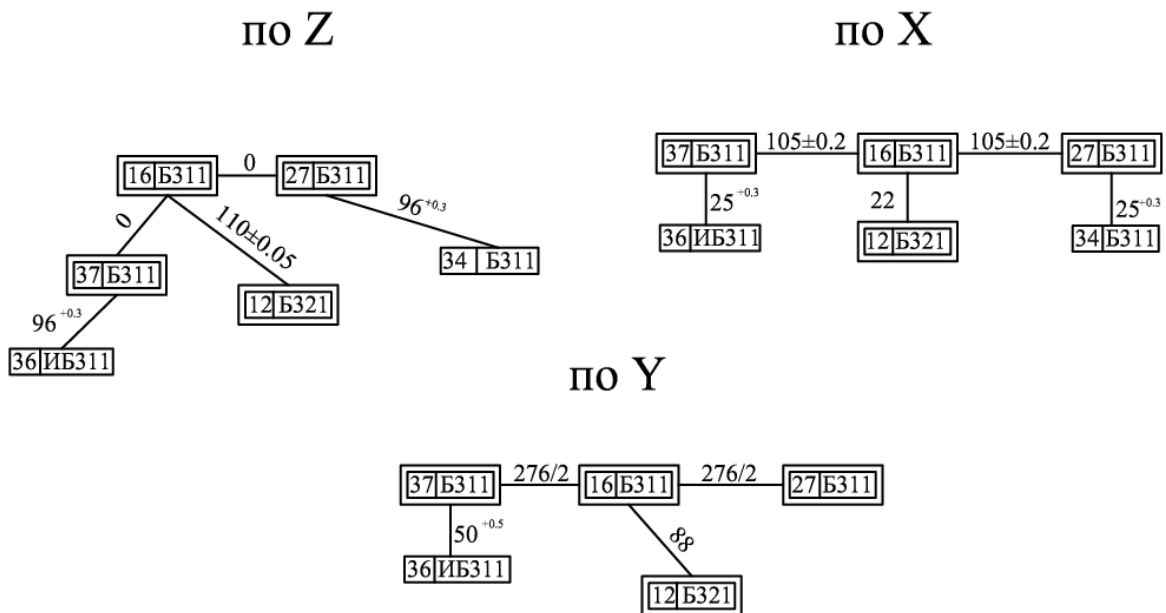


Рис. 9. Граф размерных связей МП на этапе повышенной точности

Результаты анализа графов сведем в табл. 3. В данной таблице представлены сформированные операции, в которых указаны обрабатываемые модули поверхностей на каждой позиции и выбранные модули технологических баз.

Таблица 4

Маршрут обработки детали

Этап	Операция	Установ	Позиция	МТБ	Обрабатываемые МП
Подготовки баз (Эчр)	005	А	1	16Б311, 13С112	12Б321; 5Б12
			2		
Эчр	010	А	1	12Б321	16Б311; 27Б311,34Б311; 37Б311,36ИБ311
			2		
			3		
Эпч	015	А	1	12Б321	16Б311; 27Б311,34Б311; 37Б311,36ИБ311
			2		
			3		
	020	А	1	16Б311	12Б321; 5Б12
Эч	025	А	1	16Б311	12Б321; 23-26К13, 21-22К211, 5Б12, 17-20К211, 15К222
			2		
	030	А	1	12Б321	16Б311, 1-4К211 27Б311, 28-33К211 34Б311; 37Б311, 36ИБ311, 6-11К211
			2		
			3		
Эп	035	А	1	12Б321	16Б311; 27Б311,34Б311; 37Б311,36ИБ311
			2		
			3		

Выводы

В статье рассмотрена методика формализации проектирования индивидуального технологического маршрута обработки детали типа корпус, сочетающая в себе принципы модульной технологии и теорию графов. Модульный технологический процесс объединяет в себе преимущества всех типов технологий, так как учитывает специфику изготавливаемой детали как единичный процесс, сохраняет типизацию решений на уровне МТИ как типовой процесс и решает задачу объединения деталей в партии по общности МП как групповой процесс. Применение графовых моделей позволяет наглядно оценить размерные связи между поверхностями детали и устранить ошибки при выборе схем базирования. Использование системно-структурных моделей и формальных процедур индивидуального проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей машин обеспечит повышение качества проектирования маршрута обработки деталей и сократить время технологической подготовки производства.

Библиографический список

1. **Базров Б.М.** Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М: Машиностроение, 2001. – 368 с.
2. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов: учебник для вузов: В 2 ч. / В.А. Горохов [и др.]; под ред. В.А. Горохова. – Старый Оскол: ТНТ, 2001. Ч. 2. – 576 с.
3. **Беляков, Н.В.** Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин/ Н.В. Беляков, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский. – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 147 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

E.A. Kulikova, T.N. Grebneva

**FORMALIZATION OF DESIGN OF ROUTE OF PROCESSING
OF BODY PARTS ON MACHINING CENTRE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.A. Alexeev

Purpose: Develop a methodology for the design of individual processes of body parts to improve the quality and reduce the time of technological preparation of production.

Methodology: The use of formal procedures of individual design and structural models in the development of technological routes of body parts on the basis of modular technology and graph theory.

Findings: The technique of designing of technological routes body parts processing will ensure typing technological solutions, solve the problem of optimal destination sets of databases and sequencing processing modules surfaces, and also reduce the time for technological preparation of production.

Originality: Tipitsazatsii combination of technological solutions based on modular technology and formalized approach to individual, based on graph theory for solving the problem of choosing bases

Key words: module surfaces, processing module, dimensional relations graph, information geometric model parts, the processing steps is based module.

УДК 539.434

Л.Т. Крюков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ПЕРЕХОДА МАТЕРИАЛА ИЗ ПЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ХРУПКОЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся данные эксперимента по определению момента перехода материала из пластического в хрупкое состояние. Испытуемые образцы подвергают ступенчато нарастающему с постоянным шагом нагружению до предела текучести. При этом регистрируют падение напряжения в течение постоянного интервала времени.

Ключевые слова: температура перехода, микропластическая деформация, критические напряжения.

Обычно способ определения температуры перехода материала из пластичного состояния в хрупкое основывается на построении температурной зависимости ударной вязкости при динамических испытаниях серии образцов [1]. Этот способ заключается в том, что образцы нагружаются до разрушения методом ударного изгиба. Каждый образец, охлажденный до определенной температуры, разрушают на маятниковом копре и фиксируют величину ударной вязкости. Затем строится график изменения ударной вязкости для серии образцов в зависимости от температуры. За температуру перехода в хрупкое состояние принимают температуру, при которой происходит пятидесятипроцентное уменьшение величины ударной вязкости по отношению к первоначальной.

При этом отсутствие физически аргументированных критериев ударной вязкости сводит результаты испытаний на уровень технологических проб, что выражается в малой точности результатов. Кроме того, с повышением прочности материала критерии ударной вязкости становятся все менее показательной характеристикой материала, что выражается в отсутствии явно выраженного порога хладноломкости.

Иногда температура перехода материала из пластического состояния в хрупкое определяется таким образом [2]: образец из испытуемого материала нагревается до температуры, превышающей предполагаемое значение температуры перехода из пластического состояния в хрупкое, деформируют образец и регистрируют температуру, напряжение и деформацию. Одновременно охлаждают образец в процессе его деформирования вплоть до разрушения, а температуру образца в момент разрушения $T_{кр}$ принимают за температуру перехода материала из пластического состояния в хрупкое.

Недостатком приведенных методов является то, что для осуществления предполагаемых схем испытания образцов необходимо так изменять температуру и напряжение, чтобы действующее на образец напряжение при любой температуре равнялось напряжению σ_T , то есть нагружение должно осуществляться таким образом, чтобы действующее на образец напряжение при любой температуре следовало по температурной зависимости σ_T . По классической схеме Иоффе хрупкое разрушение наступает тогда, когда предел текучести σ_T становится равным истинному напряжению отрыва S_T (рис. 1).

Если допустить, что скорость охлаждения постоянна во всех экспериментах и нагружать образец от $\sigma = 0$, начиная с T_H (начальная температура испытания, выбранная по справочным данным и превышающая $T_{кр}$) с разными скоростями деформирования 1; 2; 3; 4.

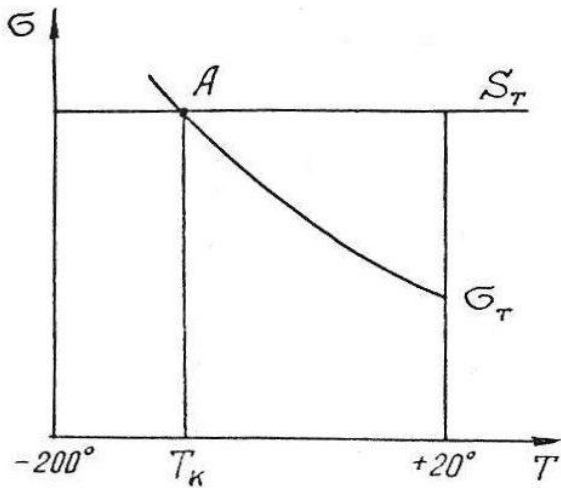


Рис. 1. Схема Иоффе

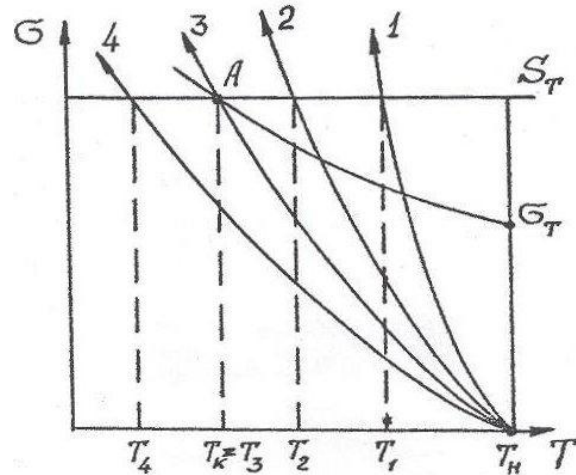


Рис. 2. Определение величины $T_{кр}$

Как видно из рис. 2, только в том случае, когда действующее напряжение пересечет точку пересечения σ_T и S_T (кривая 3), T_p будет равна $T_{кр}$. Во всех других случаях T_p будет либо выше, либо ниже $T_{кр}$. Для точного определения температуры $T_{кр}$ нужно вполне определенно знать координаты точки A , а для этого необходимо строить зависимость σ_T от температуры с учетом скорости деформации как параметра, что требует испытания серии образцов.

Используемый метод определения перехода материала из пластического в хрупкое состояние повышает точность результатов за счет введения физически аргументированных критериев состояния материала. Это достигается тем, что испытываемые образцы нагружают, регистрируют параметры нагружения и находят зависимость изменения этих параметров от температуры испытания. Каждый образец подвергают ступенчатому, нарастающему с постоянным шагом, нагружению до предела текучести. При этом регистрируют падение напряжения в течение постоянного интервала времени. По зависимости $\Delta\sigma_i(\sigma_i)$ определяют значение критического напряжения $\sigma_{кр}$, устанавливают зависимость $\frac{(\Delta\sigma_i)^2}{\sigma_{кр}}$ от температуры испыта-

ний материала, и по резкому спаду этой зависимости судят о моменте перехода материала из пластического состояния в хрупкое. Здесь $\Delta\sigma_i$ – величина напряжения за цикл нагружения; σ_i – общая величина напряжения в образце; $\sigma_{кр}$ – нагружение, соответствующее пределу пропорциональности.

При применении этого метода используют партию образцов материала. Первый образец из этой партии подвергают сжатию на специальном прессе высокой жесткости при $T = 20^\circ\text{C}$. Нагружение производят ступенчато возрастающими усилиями с постоянной величиной приращения нагрузки до предела текучести. Причем после каждой ступеньки увеличения нагрузки дают выдержку под этой нагрузкой в течение 150 с. При испытании регистрируют величину напряжения в образце σ_i и величину падения напряжения (глубину релаксации напряжения) $\Delta\sigma_i$ в образце за время выдержки при постоянной нагрузке (рис. 3, а). Для образца строят зависимость $\Delta\sigma_i = f(\sigma_i)$ (рис. 3, б).

Для каждого последующего образца этой партии уменьшают температуру испытания на 20°C , повторяя весь цикл ступенчатого нагружения, и строят зависимости $\Delta\sigma_i = f(\sigma_i)$. Для каждой зависимости характерны несколько последовательных стадий микропластиче-

ской деформации, ограниченной соответствующими группами критических напряжений ($\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_1', \sigma_2', \sigma''$ и так далее), которые характеризуются разными законами изменения глубины релаксации напряжения ($\Delta\sigma_i$), отражающей изменение скорости пластической деформации ($\dot{\xi}_p$).

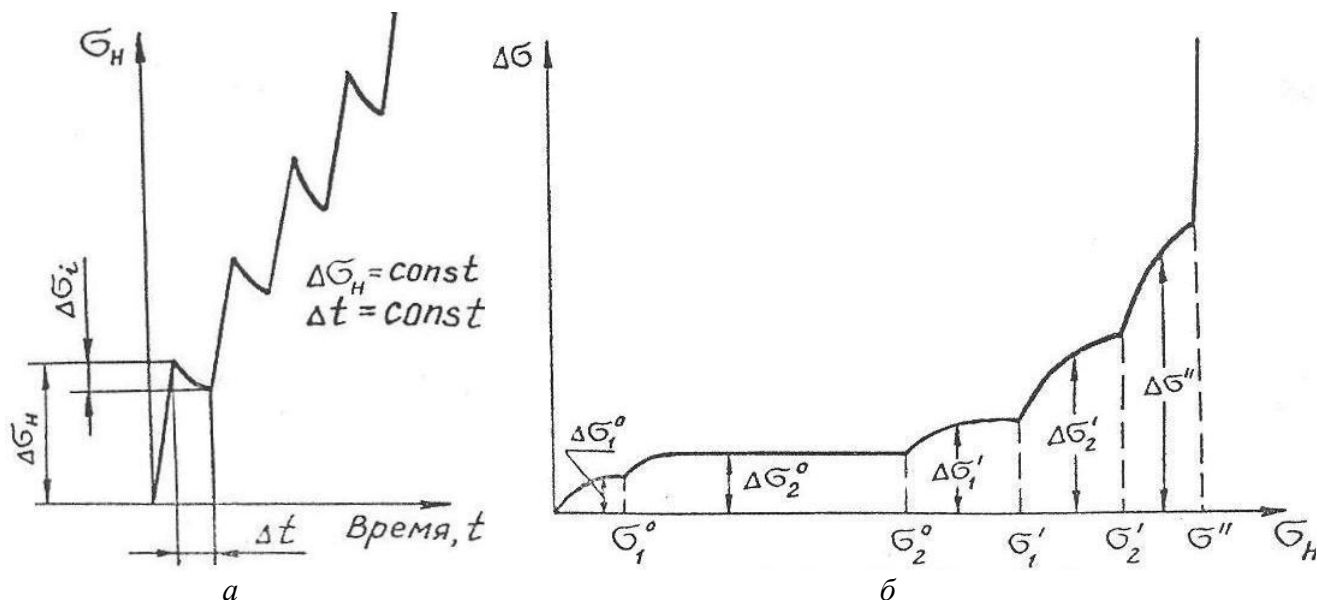


Рис. 3. Схема нагружения образца

По зависимостям $\Delta\sigma_i = f(\sigma_i)$ для каждого образца определяют критическое напряжение $\sigma_H^{кр} = \sigma_2^0$, которое ограничивает линейный участок изменения $\Delta\sigma_i = \text{const}$ (рис. 2, б). После этого строят температурную зависимость величины A , являющейся функцией двух параметров микропластической деформации ($\dot{\xi}_p$ и $\sigma_H^{кр}$)

$$A = f(\dot{\xi}_p, \sigma_H^{кр}) = \frac{(\Delta\sigma_2^0)^2}{\sigma_2^0}$$

По резкому уменьшению этой величины судят о моменте перехода $T_{кр}$ материала из пластического в хрупкое состояние. При определении температуры переход из пластического в хрупкое состояние для армо-железа изготавливались образцы диаметром 3,5 мм и высотой 7 мм.

Первый образец деформировался сжатием на специальной испытательной машине высокой жесткости при $T = -15^\circ\text{C}$. Эта температура была выбрана за первоначальную ввиду того, что ранее были проведены испытания с целью определения момента перехода армо-железа из пластического в хрупкое состояние по общепринятой методике и построены температурные зависимости изменения ударной вязкости серии образцов из этой же партии материала. Высокая жесткость деформирующего устройства, на порядок превышающая жесткость машин, используемых для определения механических свойств металлов, необходима для уменьшения вклада машина в регистрируемую величину релаксации напряжений.

Усилие замеряется с помощью датчика силы, представляющего собой стальное упругое тело с наклеенными на него по мостовой схеме тензодатчиками. Сигнал с датчика через усилитель с компенсирующим устройством подается на самопишущий регистрирующий прибор, который записывает кривые падения напряжения после каждого цикла нагружения образца.

Первоначально приложенная нагрузка равнялась 20 МПа, затем делалась выдержка $\Delta t = 150$ с. В течение этой выдержки регистрировалась на самописце величина падения напряжения. По истечении времени выдержки нагрузка увеличивалась ещё на 20 МПа и делалась выдержка длительностью 150 с, в течение которой фиксировалась величина падения напряжения $\Delta\sigma$. Такой цикл нагружения с постоянным шагом $\Delta\sigma = 20$ МПа и постоянным временем выдержки после каждого нагружения $\Delta t = 150$ с повторялся до достижения предела текучести (величина $\Delta\sigma$ становится близкой к величине $\Delta\sigma_1$ или при приращении нагрузки напряжение не растет – площадка текучести).

Строилась зависимость $\Delta\sigma$ от σ_1 (пример для $T = -70^\circ\text{C}$ показан на рис. 4).



Рис. 4. Нагружение образца из армко-железа

Для определения величины $A = \frac{(\Delta\sigma_2^0)^2}{\sigma_2^0}$, коррелирующей с $\dot{\xi}_p$, были выбраны значения $\sigma_2^0 = -1,7$ МПа и $\sigma_2^0 = 150$ МПа и подсчитывалось значение $A = 1,93 \cdot 10^{-2}$ МПа. Затем в испытательную машину устанавливали следующий образец, охлаждали вместе с упорами испытательной машины до -40°C и повторяли весь цикл ступенчатого нагружения ($\Delta\sigma = 20$ МПа) с выдержками ($\Delta t = 150$ с) до предела текучести.

Третий образец испытывался при $T = -60^\circ\text{C}$, четвертый – при $T = -70^\circ\text{C}$, пятый – при $T = -80^\circ\text{C}$, шестой – при $T = -90^\circ\text{C}$. Данные испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытания образца из армко-железа

Температура испытания, °C	$\Delta\sigma_2^0$, МПа	σ_2^0 , МПа	$A \cdot 10^{-2}$, МПа	KCU, мДж/м ²
-15	1,7	150	1,93	3,9
-40	1,45	140	1,50	3,6
-60	1,9	190	1,90	3,9
-70	1,0	220	0,455	3,6
-80	0,85	335	0,216	0,1
-90	0,8	345	0,185	0,1

По данным таблицы строится зависимость A от T и по пятидесятипроцентному уменьшению величины A от верхней площадки определяется величина $T_{кр}$ (рис. 5).

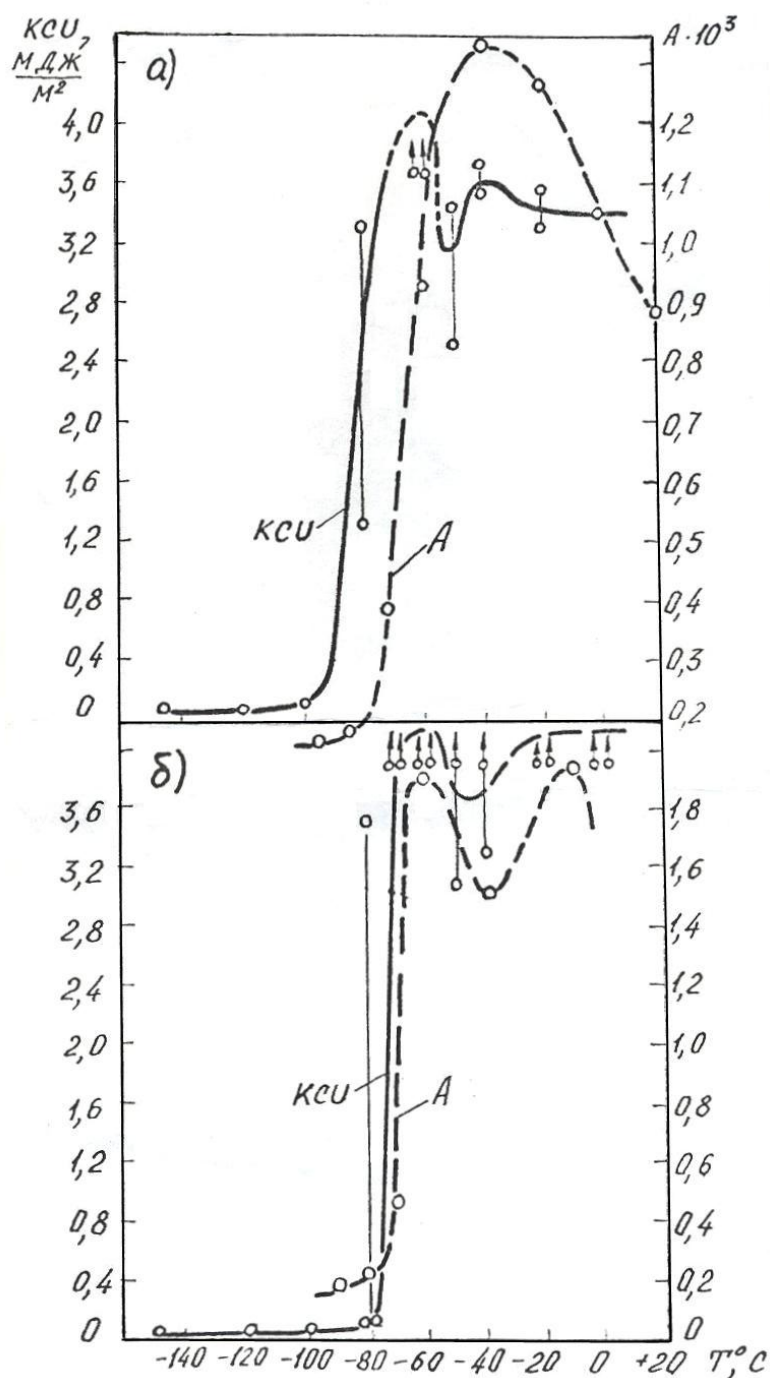


Рис. 5. Зависимость параметра A от разрушающей нагрузки

Библиографический список

1. Георгиев, М.Н. Вязкость малоуглеродистых сталей / М.Н. Георгиев. – М.: Metallurgy, 1973. С. 80–84.
2. А. с. №1052915 G01N3/00 от 03.06.1982.

Дата поступления
в редакцию 02.12.2013

L.T. Kryukov

**DETERMINATION OF THE MOMENT OF THE MATERIAL TRANSITION
FROM PLASTIC INTO BRITTLE STATE USING PARAMETERS OF MICROPLASTIC
DEFORMATION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Experimental data for determination of the moment of the substance transition from plastic into brittle state is given.

Methodology: The tested samples undergo loading, gradually rising at constant intervals until the yield point. Here stress relaxation within a constant time period is registered. Further, the dependence $\Delta\sigma_i(\sigma_H)$ is used to calculate the critical stress $\sigma_{кр}$ value. Then dependence of $(\Delta\sigma_i)^2/\sigma_{кр}$ on substance testing temperature is set.

Findings: A precipitate drop of the $(\Delta\sigma_i)^2/\sigma_{кр}$ dependence demonstrates the moment of the substance transition from plastic into brittle state.

Key words: transition temperature, microplastic deformation, critical stress.

УДК 531.395

А.Ю. Панов, Д.А. Смирнов

АНАЛИЗ ИНЕРЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РОТОРЫ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено исследование инерционного воздействия на роторы силовых гироскопов, с учетом сложного характера его движения. Получены выражения для определения главного вектора и главного момента нормальных сил инерции в относительном движении, а также главного вектора и главного момента сил инерции Кориолиса. Представлена эпюра распределения сил инерции Кориолиса. Определено соотношение между нормальными силами инерции в относительном движении и силами инерции Кориолиса.

Ключевые слова: динамика силовых гироскопов, гироскопический момент, силы инерции Кориолиса.

Гироскопический эффект является одним из проявлений инерционных свойств материальных тел. Силовые гироскопы – это гироскопы с двумя степенями свободы, генерирующие гироскопические моменты сил, если их ось вращения принуждают к изменению направления в пространстве [4]. Гироскопические моменты могут достигать значительных величин, поэтому силовые гироскопы позволяют обеспечить управление подвижными объектами, а также их стабилизацию в пространстве [3]. Например, силовые гироскопы используются как стабилизаторы космических летательных аппаратов (КЛА) [5] и как устройства управления курсом судов [1, 4-7, 9, 10].

Применение силовых гироскопов для управления подвижными объектами требует внедрения современных методов их расчета на прочность [8], которые позволяют определять как форму и размеры роторов гироскопического устройства, так и безопасные режимы их эксплуатации.

Ротор гироскопического средства управления участвует в сложном движении. В соответствии с динамической теоремой Кориолиса [2] на ротор действуют силы инерции относительного и переносного движения, а также силы инерции Кориолиса [4]. Характер и интенсивность распределения этих сил определяют величину напряжений в роторе гироскопического средства управления. В связи с этим определение инерционного воздействия на роторы силовых гироскопов является актуальной задачей.

Рассмотрим движение ротора силового гироскопа (рис. 1). По отношению к системе отсчета, связанной с подвижным объектом $S_{хуз}$, поворот рамы гироскопа относительно оси прецессии S_y с угловой скоростью $\dot{\psi}$ (рис. 1) является переносным движением, вращение ротора относительно оси собственного вращения S_{z1} с угловой скоростью $\dot{\phi}$ – относительным движением. Используем принятые в теоретической механике обозначения: $\omega_e = \dot{\psi}$ – угловая скорость переносного движения (угловая скорость прецессии), $\omega_r = \dot{\phi}$ – угловая скорость относительного движения (угловая скорость собственного вращения) [2].

Проведем оценку сил инерции в относительном движении, действующих на ротор постоянного сечения. Выделим элемент ротора массой dm , образованный двумя кольцевыми сечениями радиусов r и $r + dr$ и двумя меридиональными сечениями с углом $d\phi$ (рис. 2). Как правило, роторы силовых гироскопов работают в установившемся режиме, то есть угловая скорость собственного вращения постоянна $\omega_r = \text{const}$. Поэтому на элемент маховика массой dm действуют только нормальная сила инерции, определяемая по формуле

$$dF_H^n = a_n dm, \quad (1)$$

где dm – масса элемента ротора; a_n – нормальное ускорение элемента.

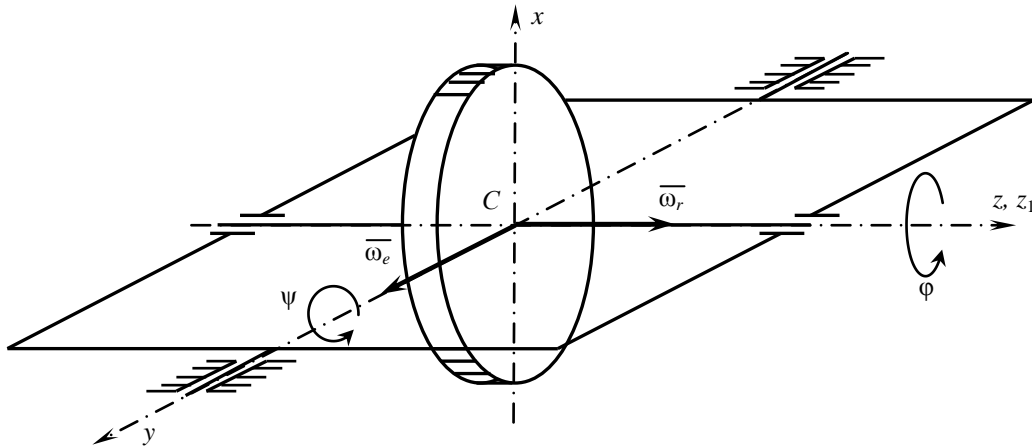


Рис. 1. Принципиальная схема силового гироскопа

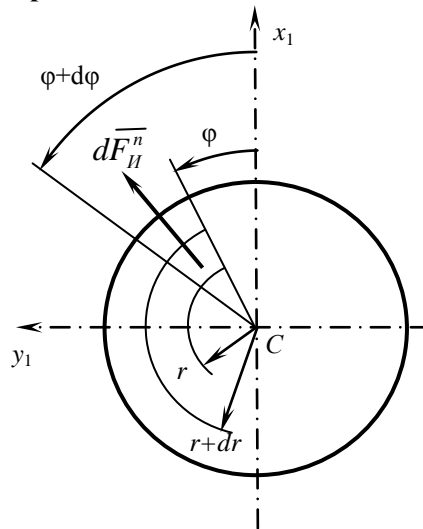


Рис. 2. Схема к определению нормальных сил инерции относительного движения

Массу dm определим по формуле

$$dm = \rho dV, \tag{2}$$

где dV - объем элемента ротора массой dm ; ρ - плотность материала ротора.

Определим объем dV по формуле

$$dV = hrd\varphi dr = hrdrd\varphi, \tag{3}$$

где h - толщина диска; r - радиус окружности, на которой распложен центр масс элемента; dr - высота элемента; $d\varphi$ - угол между меридиональными плоскостями, образовавшими элемент.

Нормальное ускорение элемента определяется формулой

$$a_n = \omega_r^2 r. \tag{4}$$

Подставляя выражения (2)–(4) в формулу (1) получим

$$dF_{II}^n = \rho h r d r d \varphi \omega_r^2 r. \tag{5}$$

Запишем выражения для проекции dF_{II}^n на оси координат Cx_1 и Cy_1 :

$$dF_{Ix_1}^n = dF_{II}^n \cos \varphi = \rho h r d r d \varphi \omega_r^2 r \cos \varphi = \rho h \omega_r^2 r^2 \cos \varphi d r d \varphi,$$

$$dF_{Iy_1}^n = dF_{II}^n \sin \varphi = \rho h r d r d \varphi \omega_r^2 r \sin \varphi = \rho h \omega_r^2 r^2 \sin \varphi d r d \varphi.$$

Дважды интегрируя по dr и $d\varphi$, получим выражения для проекций главного вектора нормальных сил инерции, действующих на элемент ротора, ограниченного радиусами r и r_0 , и плоскостями, проведенными под углами φ_0 и φ к оси Cx_1 :

$$F_{Ix_1}^n = \int_{r_0}^r \int_{\varphi_0}^{\varphi} dF_{Ix_1}^n = \int_{r_0}^r \int_{\varphi_0}^{\varphi} \rho h \omega_r^2 r^2 \cos \varphi dr d\varphi = \rho h \omega_r^2 \frac{r^3 - r_0^3}{3} (\sin \varphi - \sin \varphi_0), \quad (6)$$

$$F_{Iy_1}^n = \int_{r_0}^r \int_{\varphi_0}^{\varphi} dF_{Iy_1}^n = \int_{r_0}^r \int_{\varphi_0}^{\varphi} \rho h \omega_r^2 r^2 \sin \varphi dr d\varphi = \rho h \omega_r^2 \frac{r^3 - r_0^3}{3} (\cos \varphi - \cos \varphi_0). \quad (7)$$

Для диска постоянной толщины без отверстия ($r_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$) получим

$$F_{Ix_1}^n = \rho h \omega_r^2 \frac{r^3}{3} \sin \varphi, \quad (8)$$

$$F_{Iy_1}^n = \rho h \omega_r^2 \frac{r^3}{3} (\cos \varphi - 1). \quad (9)$$

Модуль главного вектора нормальных сил инерции определяется по формуле

$$F_{In}^n = \sqrt{(F_{Ix_1}^n)^2 + (F_{Iy_1}^n)^2} = \rho h \omega_r^2 \frac{r^3}{3} \sqrt{2(1 - \cos \varphi)}. \quad (10)$$

Так как инерционная нагрузка в относительном движении симметрична по отношению к осям гироскопа, главный момент нормальных сил инерции равен нулю.

Для определения инерционной нагрузки на ступенчатый диск переменной толщины (рис. 3), его условно можно разбить на N дисков постоянной толщины, определить по формулам (8), (9) и (10) инерционную нагрузку для каждой ступени, а затем найти сумму по формулам:

$$F_{Ix_1}^n = \frac{1}{3} \rho \omega_r^2 (\sin \varphi - \sin \varphi_0) \sum_{i=0}^N h_{i+1} (r_{i+1}^3 - r_i^3), \quad (11)$$

$$F_{Iy_1}^n = \frac{1}{3} \rho \omega_r^2 (\cos \varphi - \cos \varphi_0) \sum_{i=0}^N h_{i+1} (r_{i+1}^3 - r_i^3). \quad (12)$$

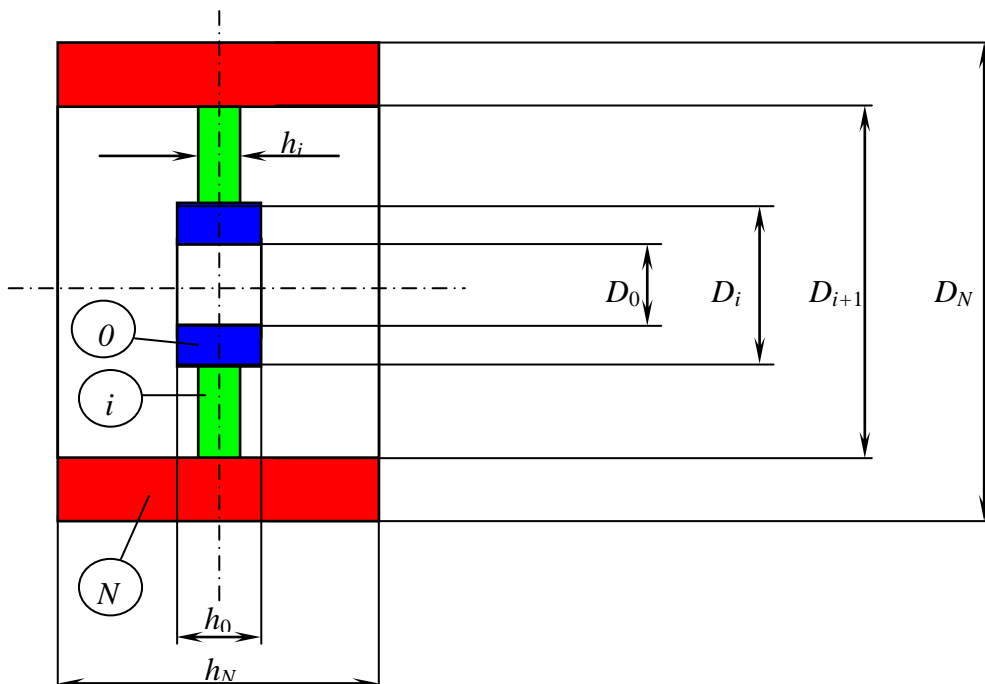


Рис. 3. Схема ступенчатого диска

Проведем оценку сил инерции Кориолиса. На каждый элемент массой dm (рис. 4) действует сила инерции Кориолиса, определяемая по формуле

$$dF_{II}^{cor} = a_{cor} dm, \tag{12}$$

где a_{cor} – ускорение Кориолиса.

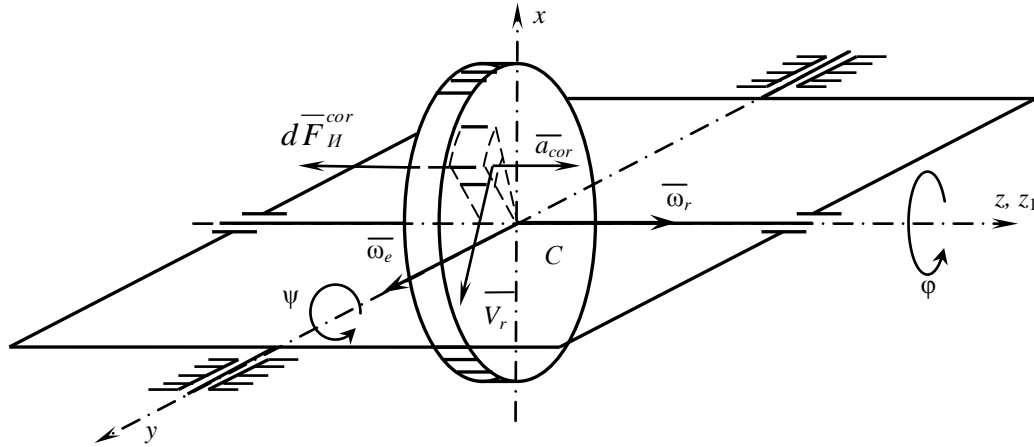


Рис. 4. Схема к определению сил инерции Кориолиса

Ускорение Кориолиса определяется по формуле

$$a_{cor} = 2\omega_e V_r \sin \alpha, \tag{13}$$

где V_r - относительная скорость; α - угол между вектором переносной угловой скорости $\bar{\omega}_e$ и вектором относительной скорости \bar{V}_r .

Относительная скорость определяется по формуле

$$V_r = \omega_r r. \tag{14}$$

Из геометрических соображений (рис. 4) имеем

$$\alpha = \varphi. \tag{15}$$

Учитывая выражения для dm (2) и dV (3) и подставляя (14), (15) в (13), получим

$$dF_{II}^{cor} = 2\rho h \omega_e \omega_r r^2 \sin \varphi dr d\varphi, \tag{16}$$

На рис. 5 представлен качественный вид распределения сил инерции Кориолиса в роторе силового гироскопа.

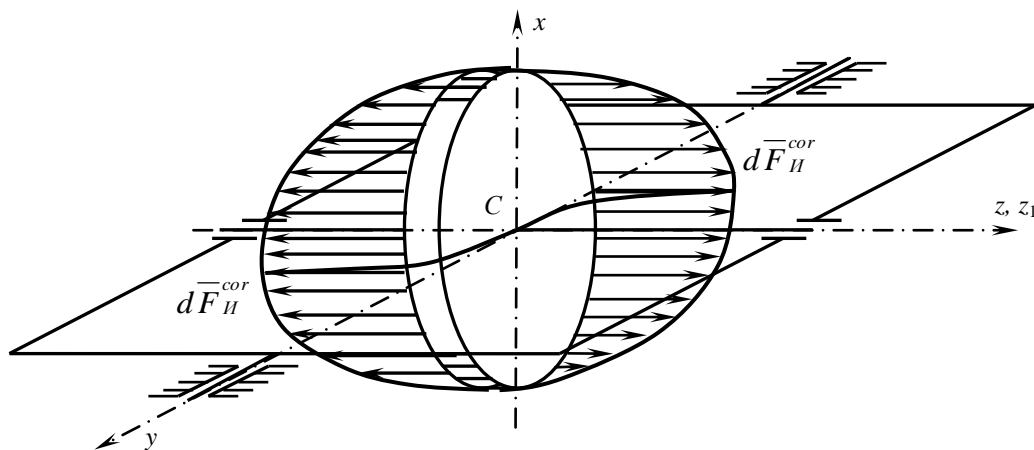


Рис. 5. Распределение сил инерции Кориолиса, действующих на ротор силового гироскопа

На рис. 6, а представлена эпюра распределения сил инерции Кориолиса по поперечному сечению ротора, выполненного в виде диска постоянной толщины без отверстия, вдоль оси Sy_1 ($\varphi = 0$).

Из рассмотрения развертки ротора в виде диска постоянной толщины без отверстия в диапазоне изменения φ от 0 до 2π , получим эпюру распределения сил инерции Кориолиса (рис. 6, б).

Дважды интегрируя по dr и $d\varphi$, получим величину главного вектора сил инерции Кориолиса, действующих на элемент ротора, ограниченного радиусами r и r_0 , и плоскостями, проведенными под углами φ_0 и φ к оси Sy_1 :

$$F_H^{cor} = \int_{r_0}^r \int_{\varphi_0}^{\varphi} dF_H^{cor} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \int_{r_0}^r 2\rho h \omega_r \omega_e r^2 \sin \varphi dr d\varphi = 2\rho h \omega_e \omega_r \frac{r^3 - r_0^3}{3} (\cos \varphi - \cos \varphi_0).$$

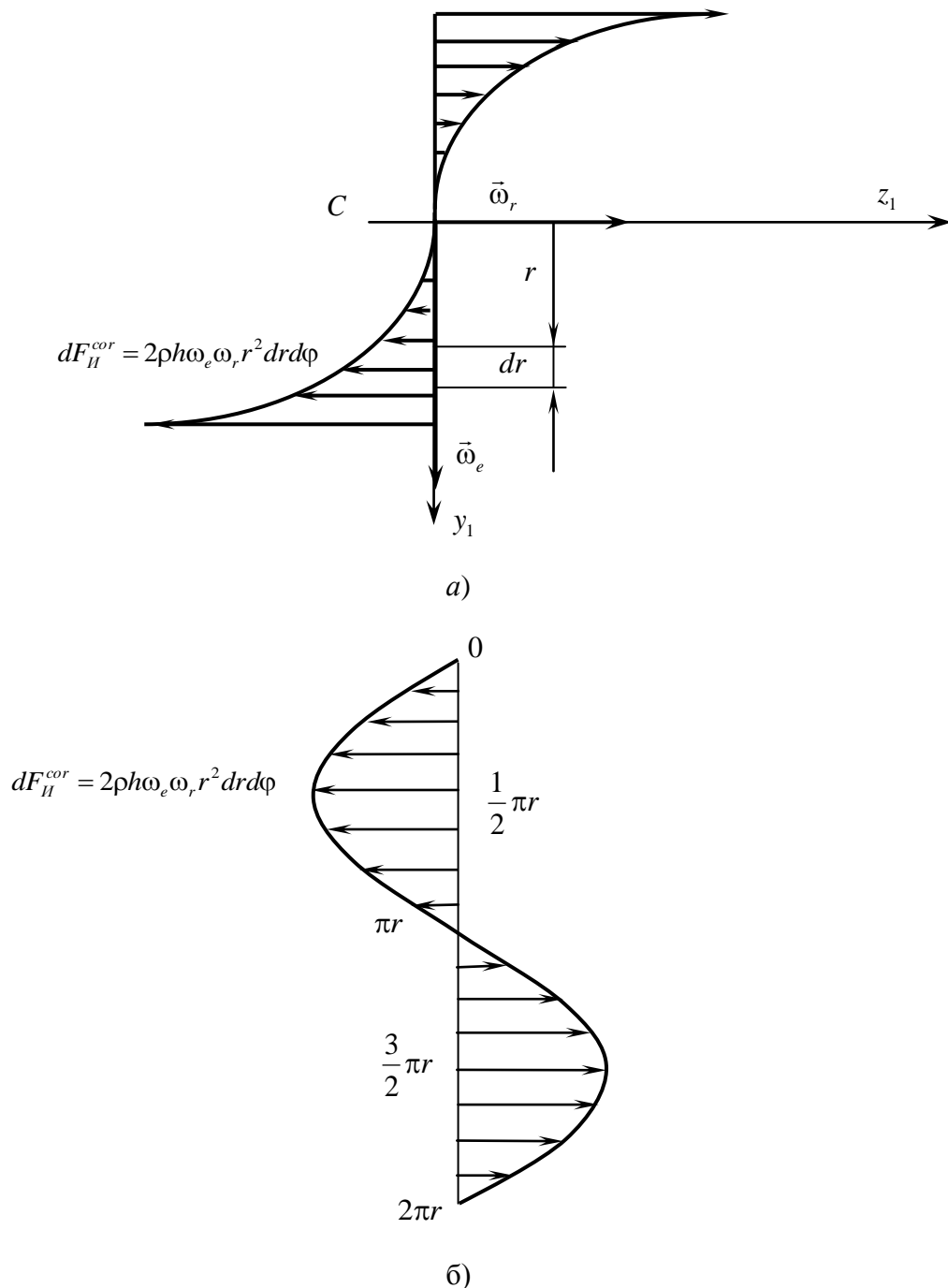


Рис. 6. Эпюры распределения сил инерции Кориолиса
а – эпюра по поперечному сечению ротора; б – развертка

Определим главный момент сил инерции Кориолиса относительно оси Cx . Момент силы инерции Кориолиса (рис. 4), действующий на массу dm относительно оси Cx , определяется формулой

$$dM_H^{cor} = dF_H^{cor} y = dF_H^{cor} r \sin \varphi, \quad (17)$$

Подставляя dF_H^{cor} , по формуле (16) получим

$$dM_H^{cor} = 2\rho h \omega_e \omega_r r^3 \sin^2 \varphi dr d\varphi.$$

Дважды интегрируя по dr и $d\varphi$, получим формулу для определения главного момента сил инерции Кориолиса, действующих на элемент ротора, ограниченного радиусами r и r_0 , и плоскостями, проведенными под углами φ_0 и φ к оси Cy_1 :

$$M_H^{cor} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \int_{r_0}^r dM_H^{cor} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \int_{r_0}^r 2\rho h \omega_r \omega_e r^3 \sin^2 \varphi dr d\varphi, \quad (18)$$

Интегрируя, получим

$$M_H^{cor} = \rho h \omega_r \omega_e \frac{r^4 - r_0^4}{4} \left(\varphi - \varphi_0 - \frac{1}{2} (\sin(2\varphi) - \sin(2\varphi_0)) \right). \quad (19)$$

Для однородного диска без отверстия радиуса R ($r = R$, $r_0 = 0$, $\varphi = 2\pi$, $\varphi_0 = 0$) получим

$$M_H^{cor} = \frac{1}{2} \rho h \omega_r \omega_e \pi R^4. \quad (20)$$

Формула (20) может служить для определения главного момента сил инерции Кориолиса.

Учитывая что $S = \pi R^2$ – площадь боковой поверхности ротора силового гироскопа, $V = hS = h\pi R^2$ – объем ротора силового гироскопа, $M = \rho V = \rho h\pi R^2$ – масса ротора силового гироскопа; $I_{z_1} = 1/2 MR^2 = 1/2 \rho h\pi R^4$ – момент инерции ротора силового гироскопа относительно оси собственного вращения Cz_1 , получим

$$M_H^{cor} = I_{z_1} \omega_r \omega_e.$$

Произведение $I_{z_1} \omega_r$ представляет собой кинетический момент ротора относительно оси собственного вращения Cz_1 :

$$K_{z_1} = I_{z_1} \omega_r.$$

Таким образом, окончательно получим

$$M_H^{cor} = \omega_e K_{z_1} = U,$$

где U – скорость вершины вектора кинетического момента K_{z_1} .

Момент сил инерции Кориолиса оказывает вращательное воздействие на раму гироскопа. Его называют гироскопическим моментом [4] и обозначают

$$M^{ГП} = M_H^{cor} = U.$$

Проведем сравнительную оценку интенсивности нормальных сил инерции относительного вращения dF_H^n и сил инерции Кориолиса dF_H^{cor} . Учитывая выражения (5) и (16), получим

$$\frac{dF_H^n}{dF_H^{cor}} = \frac{\rho h \omega_r^2 r^2 dr d\varphi}{2\rho h \omega_e \omega_r r^2 \sin \varphi dr d\varphi} = \frac{\omega_r}{2\omega_e \sin \varphi}. \quad (21)$$

При установившемся режиме работы силовых гироскопов угловая скорость собственного вращения ω_r значительно превышает угловую скорость прецессии ω_e . Следовательно, нормальные силы инерции в относительном движении являются определяющими, и в расчетах напряженно-деформированного состояния ротора влиянием сил инерции Кориолиса можно пренебречь.

Библиографический список

1. **Ишлинский, А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А.Ю. Ишлинский – М.: Изд-во АН СССР, 1976. – 680 с.
2. **Лойцянский, Л.Г.** Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. Т. 2.
3. **Павлов, В.А.** Гироскопический эффект, его проявления и использование / В.А. Павлов. – Л.: Судостроение, 1985. – 176 с.
4. **Панов, Ю.Л.** Относительное движение в механике. Инженерные задачи / Ю.Л. Панов, А.Ю. Панов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 144 с.
5. А.с. № 1244018, СССР, МКИ В63Н 25/00. Способ управления курсом судна / А.Ю. Панов, Ю.Л. Панов / Заявл. 03.01.83, опубл. 15.07.86. Бюлл. № 26, 1986.
6. А.с. № 1449458, СССР, МКИ В63 25/00. Способ управления гироскопами курсом судна / А.Ю. Панов, Ю.Л. Панов // Заявл. 10.06.87., опубл. 07.01.89. Бюлл. № 1, 1989.
7. **Панов, А.Ю.** Гироскопическое устройство управления курсом судна / А.Ю. Панов, Ю.Л. Панов, Е.И. Шапкин // Проблемы создания новой техники для освоения шельфа: тез. докл. VI научно-технич. конф. – Горький: ГГУ, 1989. С. 114–115.
8. **Смирнов, Д.А.** Исследование напряженно-деформированного состояния роторов гироскопического устройства управления судном в автоматизированной системе конечно-элементного анализа. // Информационные технологии в учебном процессе: материалы всерос. научно-методич. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2008. С. 171–175.
9. **Tadoo, S.** Гироскопическое рулевое устройство № 47-29918, заявка № 53-432, Япония, МКИ В63Н 25/00, НКИ 84 F3 от 25.03. 1972.
10. Pat. UK, IC В63Н 25/08, В7V, 1357896. Decl. 03.07.1970, publ. 26.06.1971 / Lithgow, W.L. Improvements in or relating to a ships steering.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

A. Yu. Panov, D.A. Smirnov

**ANALYSES OF THE INERTIAL EFFECTS
ON THE ROTORS OF POWER GYROSCOPES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Study of the influence of the inertia forces on the dynamics of complex motion of rotors of power gyroscopes.

Design/methodology/approach: Expressions and formulas for the inertial forces in a figurative and relative motion, and Coriolis forces of inertia is determined by the methods of theoretical mechanics and mathematical modeling.

Findings: Defined expressions for the principal vector and principal moment of inertia forces in relative motion, as well as the principal vector and principal moment of inertia forces of the Coriolis. Presents plot of the distribution of the Coriolis forces of inertia. The relation between the forces of inertia in relative motion and Coriolis forces of inertia.

Research limitations/implications: The conclusion is that the normal forces of inertia in relative motion, are crucial for the analysis of stress-strain state of the rotor. The influence of Coriolis forces of inertia in such calculations can be neglected.

Originality/value: The results may be used for analysis of stress-strain state of rotors of power gyroscopes.

Key words: Dynamics of power gyroscopes, gyroscopic moment, Coriolis forces of inertia.

УДК 658.527.011

А.А. Иванов

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЯ
С ПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментальных исследований пьезопреобразователей с продольной поляризацией, используемых в конструктивных схемах пьезодвигателей с косыми соударениями и двумерными колебаниями при различных комбинациях продольных, поперечных, изгибных и других колебаний. Предложена методика расчета характеристик ПД.

Ключевые слова: пьезодвигатель, подвижное звено, метод косых соударений, продольная поляризация.

Пьезоэлектрический эффект был открыт братьями Кюри в 1880 г. Впервые его начали применять, используя естественные монокристаллы (такие, как кварц) в 1920 г. В 1950 г. появляется пьезоэлектрическая керамика, например, PZT. Позже появились пьезоэлектрические полимеры (PVDF). Было открыто, что для получения пьезоэлектрического эффекта пьезокерамику необходимо подвергать процессу поляризации, а для улучшения пьезоэлектрических свойств структура кристалла должна быть асимметричной.

В настоящее время активно ведутся исследования различных конструкций высокочастотных пьезокерамических преобразователей (ПКП) с целью разработки на их основе пьезодвигателей (ПД) промышленных приводов для систем точного позиционирования (СТП). Пьезоэлектрики являются обратимыми электрохимическими преобразователями, то есть они способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Преобразователи, основанные на использовании прямого пьезоэффекта, называют преобразователями-генераторами. Они имеют механический вход и электрический выход. Преобразователи, основанные на использовании обратного пьезоэффекта, называют преобразователями-двигателями, которые имеют электрический вход и механический выход. Для пьезоактивного материала характерно наличие поляризационного заряда при его механической деформации, а при внесении его в электрическое поле наблюдается изменение его длины. Установлено, что изменение направления электрического поля вызывает переход от растягивающего напряжения пьезоэлемента (ПЭ) к сжимающему. Электрическая поляризация, связанная с поверхностным зарядом, в первом приближении увеличивается линейно относительно механического напряжения.

Основой пьезодвигателя служит пьезоэлектрик, то есть элемент, изготовленный из пьезоэлектрического материала. Если ПЭ используется как электромеханический преобразователь, то его ориентацию выбирают из условия достижения наибольшего эффекта. Внешние силы (механические и электрические), воздействующие на ПЭ, могут быть как распределенными, так и сосредоточенными. Распределенные силы позволяют достичь более эффективного преобразования, поэтому для более полной поляризации объема ПЭ используют электроды, покрывающие всю площадь граней пьезоэлектрика.

Токопроводящие покрытия на гранях ПЭ можно получить, например, напылением металла в вакууме. При воздействии на ПЭ сосредоточенной силы ее можно преобразовать в распределенную путем установки накладок из упругого материала, которые должны плотно прилегать к граням ПЭ.

В СТП находят применение схемы с косыми соударениями, в которых пьезодвигатель расположен под углом к контактной плоскости подвижного звена (ПЗ), смонтированного в шариковых направляющих. Непрерывное движение ПЗ происходит за счет серии косых соударений наконечника ПД с частотой колебаний напряжения, подводимого к пьезопреобразователю.

Расчет характеристик пьезодвигателя (ПД) проведем применительно к схеме перемещения подвижного звена (ПЗ) методом косых соударений (рис. 1).

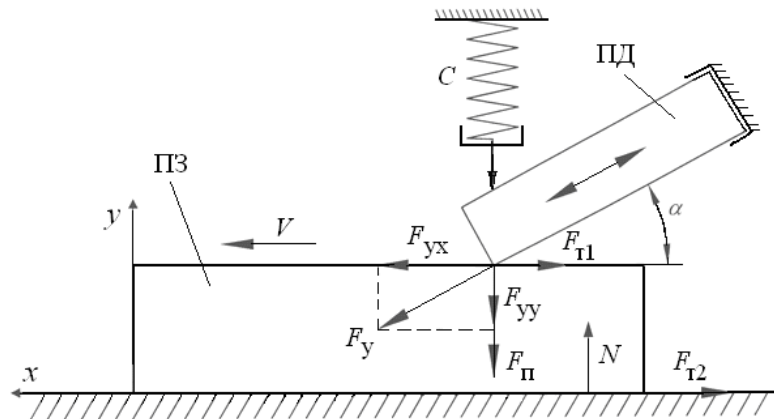


Рис. 1. Схема сил, действующих на ПЗ, при его перемещении методом косых соударений:
ПД – пьезодвигатель с продольной поляризацией

Сила удара F_y возникает при быстрой деформации растяжения ПД. Горизонтальная составляющая F_{yx} этой силы является движущей силой.

Первое условие перемещения ПЗ имеет вид:

$$F_{yx} > F_{ин} + F_{т2},$$

где $F_{yx} = F_y \cos \alpha$; $F_{ин} = ma$ – сила инерции ПЗ; m, a – масса и ускорение ПЗ; $F_{т2} = Nf_2$ – сила трения в направляющих ПЗ; $N = P + F_{yy} + F_{п}$ – нормальная реакция опоры ПЗ; f_2 – коэффициент трения в направляющих; $P = mg$ – вес каретки ПЗ; g – ускорение свободного падения.

Второе условие перемещения ПЗ:

$$F_{yx} < F_{т1},$$

где $F_{т1} = (F_{yy} + F_{п})f_1$ – сила трения между ПД и контактной плоскостью ПЗ; $F_{yy} = F_y \sin \alpha$; $F_{п}$ – сила поджатия ПД пружиной; f_1 – коэффициент сухого трения скольжения.

Для выполнения первого условия необходимо, чтобы коэффициент трения f_2 был минимален. Это достигается заменой направляющих скольжения ПЗ на направляющие качения (например, шариковые направляющие). Для выполнения второго условия необходимо увеличить коэффициент трения f_1 (например, за счет поджатия пружины). Это позволяет исключить или минимизировать проскальзывание точки контакта ПД относительно поверхности ПД.

Подставим значения всех действующих сил и запишем оба условия в развернутом виде:

$$\frac{F_{п}f_1}{\cos \alpha - f_1 \sin \alpha} > F_y > \frac{m(a + gf_2) + f_2}{\cos \alpha - f_2 \sin \alpha}.$$

Полученное выражение показывает границы, в которых должно лежать значение силы удара, возникающего при колебаниях ПД.

Таким образом, движение ПЗ будет представлять собой совокупность дискретных перемещений. При каждом ударе ПД по поверхности ПЗ сила удара будет меняться от нуля до максимального значения и снова до нуля, тем самым будет изменяться и сила трения между контактирующими звеньями – силу трения покоя будет сменять сила трения скольжения.

Структурно-параметрическая модель пьезодвигателя строится в результате совместного решения волнового уравнения, соответствующего уравнения пьезоэффекта и граничных условий на двух нагруженных рабочих поверхностях пьезодвигателя [1, 2]. Рассмотрим простой ПД в виде пьезопластины толщиной δ с электродами, нанесенными на две параллельные грани, которые перпендикулярны вектору X (рис. 2).

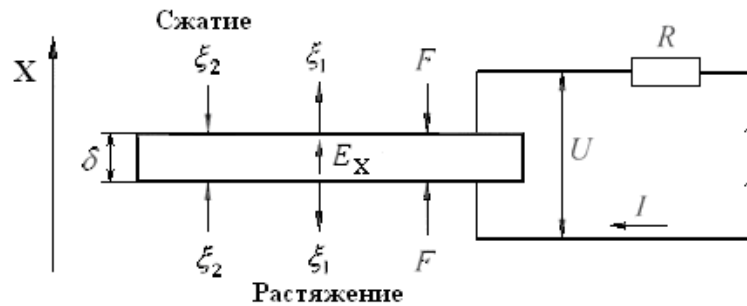


Рис. 2. Схема простого пьезодвигателя с продольным пьезоэффектом:
 ξ_1, ξ_2 – смещения граней пластины при растяжении и сжатии; F – внешние силы;
 E_X – напряженность электрического поля; U – напряжение на электродах пластины;
 I – ток; R – нагрузка

Для вывода уравнений колебаний ПД выделим элемент высотой dx с площадью поперечного сечения S_0 . Запишем в общем виде уравнение сил, действующих на выделенный элемент:

$$F_{ин} + F_{вт} + P_{yc} = F_{вк}, \quad (1)$$

где $F_{ин}$ – инерционная сила сопротивления; $F_{вт}$ – сила вязкого трения, пропорциональная скорости смещения сечения x пластины; P_{yc} – сила упругого сопротивления; $F_{вк}$ – сила, вызывающая вынужденные колебания пьезодвигателя.

Уравнение обратного пьезоэффекта для продольных колебаний при управлении по напряжению имеет вид [1, 2]

$$S_X = d_{33}E_X(t) + \varepsilon_X T_X, \quad (2)$$

где $S_X = \partial\xi/\partial t$ – скорость деформации пьезопластины в направлении X ; ξ – смещение сечения x пластины; d_{33} – пьезомодуль при продольной поляризации пластины; $E_X(t) = U(t)/\delta$ – напряженность электрического поля в направлении X ; $U(t)$ – напряжение на электродах пьезопластины; ε_X – упругая податливость в направлении X при $E_X = \text{const}$; T_X – механическое напряжение в пьезопластине.

Уравнение сил, действующих на пьезопластину, представим в виде

$$T_X S_0 = F + m \partial S_X / \partial t, \quad (3)$$

где F – внешняя сила, приложенная к пьезопластине; m – перемещаемая масса ПЗ; $\partial S_X / \partial t$ – ускорение смещения сечения пьезопластины.

Решая совместно уравнения (1), (2) и (3), можно получить систему уравнений, описывающих структурно-параметрическую модель простого пьезодвигателя с продольной поляризацией пластины.

Механическая характеристика пьезодвигателя при $E_X = \text{const}$ представляет собой зависимость удлинения Δl от внешней нагрузки F (усилия стяжки пакета пьезопластин):

$$\Delta l = d_{33}nU - \frac{\varepsilon_X Fl}{S_0}, \quad (4)$$

где n – число пьезопластин в ПД; $l = n\delta$ – длина составного ПД.

Из уравнения (4) видно, что удлинение Δl принимает максимальное значение при $F = 0$:

$$\Delta l = d_{33}nU_{max}.$$

Максимальное рабочее усилие, которое способен выдавать составной ПД, можно определить из (4) при $\Delta l = 0$:

$$F_{max} = \frac{d_{33}E_{Xmax}S_0}{\varepsilon_X},$$

где $E_{Xmax} = U_{max}/\delta$ – максимальное значение напряженности электрического поля в направлении X .

Для вывода системы уравнений эквивалентного механического четырехполюсника составного пьезодвигателя рассматриваются и решаются соответствующие матричные уравнения [1, 2]. В результате совместного рассмотрения системы уравнений для эквивалентного четырехполюсника уравнения сил на гранях составного пьезодвигателя и уравнения силы, возбуждающей колебания (подобно силе, возбуждающей колебания простого пьезодвигателя), после некоторых арифметических преобразований получают систему уравнений, описывающую структурно-параметрическую модель составного пьезодвигателя при продольном пьезоэффекте.

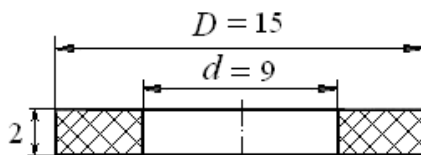


Рис. 3. Кольцо составного ПД из пьезокерамики ЦТС-19

Приведем экспериментальные графики максимального удлинения Δl_{\max} составного пьезодвигателя от приложенной внешней нагрузки F_{\max} для различных значений подводящего напряжения. Графики построены для ПД из десяти пьезоколец размером $D = 15$ мм, $d = 9$ мм, $\delta = 2$ мм (рис. 3). Кольца были изготовлены из керамики ЦТС-19, для которой пьезомодуль $d_{33} = 350 \cdot 10^{-12}$, упругая податливость $\epsilon_x = 3 \cdot 10^{-11}$ м²/Н. Площадь верхней и нижней граней пьезоэлемента составляет $S_0 = \pi(D-d)^2/4 = 1,308$ мм².

Максимальное удлинение и внешняя нагрузка для различных значений напряжения представлены в табл. 1.

График $\Delta l(F)$ показан на рис. 4, а, а график $\Delta l(U)$ – на рис. 4, б.

Таблица 1

Максимальное удлинение и внешняя нагрузка для различных значений напряжения

U , В	Δl_{\max} , м	F_{\max} , Н
100	$4 \cdot 10^{-7}$	18,85
150	$6 \cdot 10^{-7}$	28,274
200	$8 \cdot 10^{-7}$	37,7
300	$1,2 \cdot 10^{-6}$	56,55

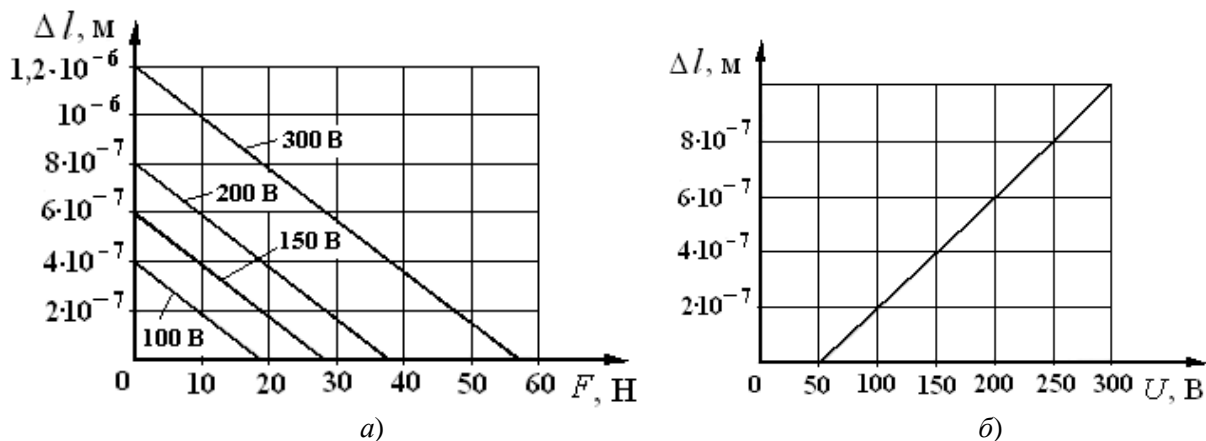


Рис. 4. Графики зависимости удлинения пьезодвигателя от внешней нагрузки (а) и от напряжения при $F = 10$ Н (б)

Вывод: расчет характеристик пьезодвигателя проведен применительно к схеме перемещения подвижного звена методом косых соударений. В результате получены границы, в которых должно лежать значение силы удара, возникающего при колебаниях высокочастотного пьезокерамического преобразователя.

Библиографический список

1. **Афонин, С.М.** Структурно-параметрическая модель составного пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2007. № 1. С. 3–13.
2. **Иванов, А.А.** Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки: учеб. пособие / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 224 с..

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

A.A. Ivanov

THE CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE PIEZOENGINE WITH LONGITUDINAL POLARIZATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Employment methods of the calculation of the characteristics of the piezoengine with longitudinal polarization.

Methodology: A theoretical framework is proposed based on the results of the experimental investigations of piezoconverters with longitudinal polarization. Subsequently constructive schemes of piezoengines with oblique co-strokes and oscillations in both directions are quoted. For example different combinations of longitudinal, lateral and curved oscillations are used.

Findings: It is possible to accomplish independent excitement of these oscillations if frequencies of proper longitudinal oscillations are equal to the second form of curved oscillations. Consequently the choice of optimal amplitude and phase correlations between separate components of oscillations in the contact zone.

Research limitations/implications: The present study provides methods of the calculation of the characteristics of the piezoengine in relation to the moving scheme of a movable link by the method of oblique collisions is shown. As a result the boundary values of power of the strike which occurs during vibrations of the high-frequency piezoceramic transducer are obtained.

Key words: piezoengine, movable link, method of oblique collisions, longitudinal polarization.

УДК 006.057

В.Н. Кайнова, Е.М. Демьянович

**РОЛЬ ТЕРМИНА «ЗАВИСИМЫЙ ДОПУСК», ВЛИЯЮЩЕГО
НА СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ И ТРУДОЕМКОСТИ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НЕОТВЕТСТВЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены стандарты, которые установили одно обозначение, но разное толкование для двух терминов: «зависимый допуск», и «требование максимума материала». Термин «зависимый допуск» широко используется в производственных условиях России. Его применение снижает трудоемкость и себестоимость изделий крупносерийного и массового производства, когда необходимо обеспечить только собираемость в неотвечественных соединениях.

Ключевые слова: зависимый допуск, максимум материала, геометрический допуск, неотвечественные соединения, контроль, калибры расположения, крупносерийное производство, себестоимость, трудоемкость.

В настоящее время Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) выполняет работы по пересмотру национальных стандартов в соответствии с международными требованиями стандартов ИСО. Новые требования, отраженные в одном стандарте, влияют на ряд других взаимосвязанных стандартов и их применение в производственных условиях. Часто эти требования бывают не согласованными, что вызывает у производителей и в учебном процессе трудности в их реализации.

Ряд новых стандартов рассматривают вопросы оформления конструкторской документации. Конструкторская документация (КД) – это интеллектуальная продукция (товар). Как товар она претерпевает все изменения наравне с товарной продукцией. Но при всеобщей приватизации промышленных предприятий для перехода к рыночной экономике конструкторская документация (архив) не была приватизирована. Она осталась бесхозной, по оценкам специалистов, на долю конструкторской и технологической документации приходится 30–50% стоимости промышленного предприятия. Конструкторская документация определяет проектное качество изделия, в котором должны быть отражены требования всех заинтересованных сторон (потребителя, изготовителя и общества).

Нормативные требования, правила и положения стандартов ЕСКД в целях безопасности изделий должны быть обязательными. Стандарты ЕСКД должны стать предметом технического регулирования, в технических регламентах на машиностроительную продукцию необходимо использовать соответствующие стандарты ЕСКД. Эти аспекты должны также учитываться в договорах (контрактах) на продукцию (разработка, поставка, применение и др.).

Конструкторская документация нуждается в подтверждении соответствия (сертификации) добровольного или обязательного характера. Это значимый и ответственный вид интеллектуальной продукции. Федеральный закон «О техническом регулировании» впервые в нашей стране позволяет реализовать эти уникальные возможности для КД. Не менее важен вопрос о государственной поддержке КД, разрабатываемой и применяемой в электронной форме (ИПИ-технологии) с целью соответствия требованиям международного рынка.

ЕСКД – комплекс стандартов, устанавливающих взаимосвязанные нормы и правила по разработке, оформлению и обращению конструкторских документов (товарная продукция), разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия (проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонта и т.п.).

С 1 января 2012 г. вступил в силу ГОСТ 2.308-2011 «ЕСКД. Указания допусков формы и расположения поверхностей», разработанный (группа Т52) ФГУП "ВНИИНМАШ",

АНО НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика» и принятый Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 12 мая 2011 г. N 39), который устанавливает правила указания допусков формы и расположения поверхностей в графических документах на изделия всех отраслей промышленности.

Параллельно вступает в силу национальный стандарт ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО 1101:2004) «ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения», разработанный (группа Г02) ОАО «НИИИзмерения» на основе аутентичного перевода на русский язык стандарта ИСО, выполненного ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». Он распространяется на нормирование геометрических характеристик изделий и устанавливает определения и правила указания на чертежах допусков формы, ориентации, месторасположения и биения.

ГОСТ 2.308-2011 не дает ссылок на ГОСТ 24642-81 «ОНВ. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения», который не отменен и дает подробные пояснения по терминам. Указано, что на территории Российской Федерации ГОСТ 24642 не действует, а действует ГОСТ Р 53442-2009. Хотя для стран СНГ он продолжает действовать. А термины и обозначения в двух ранее указанных стандартах разные. Почему в 2011 г. нельзя было учесть требования стандарта 2009 г.? Зачем нужен стандарт ЕСКД? Как видим, даже в заглавиях стандартов используется разная терминология, хотя они оба решают вопросы по нормированию геометрической точности изделий. ГОСТ Р 53442-2009 ввел ряд новых терминов, учитывая стандарты ИСО. Плохо то, что эта терминология не учтена в ГОСТ 2.308-2011. Например, «геометрический допуск» как комплексное понятие допусков формы и расположения поверхностей, «требование максимума материала» взамен понятию «зависимый допуск».

Геометрические допуски следует устанавливать в соответствии с функциональными требованиями, предъявляемыми к изделию. При этом необходимо также принимать во внимание требования к изготовлению и контролю изделия [2]. Требования по указанию геометрических допусков на чертежах имеют много общих данных со стандартом ЕСКД, хотя ссылка дана на ГОСТ 2.308-79. Дублирование и разночтение одних и тех же требований усложняет работу при проектировании и изготовлении изделий.

Первый стандарт межгосударственный, а второй национальный. По статусу межгосударственный стандарт выше, следовательно, учитывая добровольность применения стандартов в настоящее время, его можно не использовать. Инженерные службы промышленных предприятий встали в тупик: какой стандарт применять? Особенно остро встал вопрос о применении зависимых допусков и использовании калибров расположения на основе действующих стандартов ГОСТ Р 50056-92 [3] и ГОСТ 16085-80. [4].

Размерными элементами могут быть цилиндр, сфера, две параллельные плоскости, конус или призма [9]. Геометрический элемент: точка, линия или поверхность. Полный геометрический элемент: поверхность или линия на поверхности. Производный геометрический элемент: средняя точка, средняя линия или средняя поверхность, которые произведены от одного или нескольких полных элементов.

По данным первого стандарта, символ \textcircled{M} указывает на зависимый допуск, во втором стандарте этим символом обозначают требование максимума материала.

Зависимые допуски формы, расположения и координирующих размеров обеспечивают сборку деталей по методу полной взаимозаменяемости без какого-либо подбора парных деталей, поскольку дополнительное отклонение формы, расположения или координирующих размеров элемента (или элементов) компенсируется отклонениями действительных размеров элементов той же самой детали [3].

В том случае, когда требуется обеспечить собираемость деталей, используют требование максимума материала [2]. На первый взгляд, оба термина требуют обеспечить собираемость, но при дальнейшем рассмотрении обнаружено разночтение. Поэтому использовать один символ для разных требований нельзя.

ГОСТ Р 53442-2009 дает ссылку на два других национальных стандарта [7, 8], раскрывающие суть вопроса. Впервые понятия «принцип максимума материала» и «предел максимума материала» введены ГОСТ Р 50056-92 [3].

Рассмотрим термины и положения этого стандарта.

Принцип максимума материала – метод (принцип) назначения допусков формы, расположения или координирующих размеров, при котором требуется, чтобы рассматриваемый элемент не выходил за предельный действующий контур, а базовый элемент - за контур максимума материала.

Предельный действующий контур – поверхность (поверхности) или линия, имеющая номинальную форму, номинальное расположение относительно базы (баз) и размер, определяемый пределом максимума материала элемента и указанным на чертеже числовым значением зависимого допуска формы, расположения или координирующего размера.

Минимальное значение зависимого допуска – числовое значение зависимого допуска, когда рассматриваемый (нормируемый) элемент и/или база имеют размеры, равные пределу максимума материала. Минимальное значение зависимого допуска указывают в чертежах или других технических документах; по нему определяют предельный действующий размер.

Максимальное значение зависимого допуска – числовое значение зависимого допуска, когда рассматриваемый элемент и/или база имеют размеры, равные пределу минимума материала, т.е. происходит увеличение минимального значения зависимого допуска на допуск рассматриваемого размерного элемента.

Действительное значение зависимого допуска – числовое значение зависимого допуска, соответствующее действительным размерам рассматриваемого элемента и/или базы. Действительное значение зависимого допуска расположения или формы индивидуально для каждого экземпляра детали.

Предельный действующий контур соответствует измерительному элементу калибра для контроля расположения (формы) поверхностей. Этот принцип учитывается при проектировании калибров расположения [4] смещением поля допуска калибра в поле допуска расположения. Предел максимума материала рассматриваемого элемента принимается равным номинальному размеру

Предельный действующий размер – размер предельного действующего контура. Для вала он равен сумме номинального размера и минимального значения зависимого допуска, а для отверстий разность этих величин.

Местный размер: размер, измеренный по двухточечной схеме измерения в любом сечении элемента.

Размер по сопряжению:

- для цилиндрических наружных элементов - диаметр наименьшего описанного (прилегающего) цилиндра;
- для цилиндрических внутренних элементов - диаметр наибольшего вписанного (прилегающего) цилиндра;
- для резьбовых элементов - размер по сопряжению соответствует приведенному среднему диаметру резьбы.

Рассмотрим требования более нового стандарта ГОСТ Р 53090-2009, соответствующего международным требованиям. Согласно ГОСТ Р 53090-2009, требование максимума материала относится к реальному размерному элементу и ограничивает его материал снаружи действующей границей максимума материала. Требование максимума материала применяют с целью обеспечения собираемости изделия [8].

Размер максимума материала относится к тому из предельных размеров, которому соответствует больший объем материала детали, т.е. наибольшему предельному размеру наружного (охватываемого) элемента (вала) или наименьшему предельному размеру внутреннего (охватывающего) элемента (отверстия) [8].

Действующий размер максимума материала – это размер, определяемый суммарным действием размера максимума материала рассматриваемого размерного элемента и геометрического допуска (формы, ориентации или месторасположения), установленного для производного элемента от того же самого размерного элемента. Действующий размер максимума материала является числовой характеристикой действующей границы максимума материала.

Для внешних (охватываемых) элементов – сумма размеров максимума материала и геометрического допуска, а для внутренних (охватываемых) – разность этих значений. Размер предельного действующего контура [3] так называется и рассчитывается – это термин.

В ГОСТ 16085 эти формулы применяются для расчета размеров калибров расположения, так как калибр должен быть подобен сопрягаемой детали по отношению к контролируемой.

В том случае, когда требуется обеспечить собираемость деталей, используют требование максимума материала, а в случае необходимости ограничения минимальной толщины стенки – требование минимума материала. Эти требования позволяют объединить ограничения, накладываемые допуском размера и геометрическим допуском, в одно комплексное требование, более точно соответствующее предполагаемому назначению детали [8].

Это комплексное требование позволяет (без ущерба для выполнения детали своих функций) увеличивать геометрический допуск нормируемого элемента детали, если действительный размер элемента не достигает предельного значения, определяемого установленным допуском размера [8]. Такая запись дана по стр.2 ГОСТ Р 53090-2008, однако дальше по тексту это положение не реализовано. Увеличение геометрического допуска указывает на его переменный характер, что отражено в понятии зависимый допуск в ГОСТ Р 50056-92. В расчетах, данных в стандарте, это нигде не показано, что затрудняет оценку требования максимума материала как требования зависимого допуска.

Требование максимума материала к нормируемому элементу указывают на чертеже знаком \textcircled{M} , помещаемый в рамку допуска после значения геометрического допуска, установленного для производного элемента от нормируемого размерного элемента [8].

ГОСТ Р 53089-2008, который рассматривая позиционные допуски, ввел в 2008 г. понятие «теоретически точные размеры». Это линейные и/или угловые размеры, определяющие теоретически точное месторасположение геометрических элементов относительно друг друга и/или относительно баз. Линейные и угловые теоретически точные размеры указывают без предельных отклонений и заключают в прямоугольные рамки [7].

В ГОСТ 2.307-2011 сказано, что линейные и угловые размеры, определяющие номинальное расположение указывают в графическом документе без предельных отклонений и заключают в прямоугольные рамки. Следует, что номинальный размер – это теоретически точный размер.

В производственной практике России широко применяется термин «зависимый допуск» (ГОСТ 24642; ГОСТ 2.307; ГОСТ 2.308; ГОСТ 16085; ГОСТ Р 50056 и др.), числовое значение которого переменное для разных деталей, изготавливаемых по данному чертежу. Зависимый допуск распространяется на ряд допусков формы или расположения поверхностей. Зависимые допуски расположения находят широкое применение в крупносерийном и массовом производстве для неотъемлемых соединений с гарантированным зазором, когда требуется обеспечить только собираемость. Они более экономичны и выгодны для производства по сравнению с независимыми геометрическими допусками.

Если указан зависимым геометрический допуск (формы или расположения поверхностей), то его величина изменяется в зависимости от действительных размеров нормируемого и/или базового элементов [3]. При указании зависимого допуска производится увеличение заданного геометрического допуска на величину допуска размерного элемента, независимо наружная или внутренняя поверхность у размерного элемента. Параметры увеличения геометрического допуска при наличии требования максимума материала в стандарте [8] не отражены, что не позволяет считать оба требования идентичными.

Наиболее широко применяются зависимые допуски для позиционных допусков, координирующих расположение отверстий под крепеж. Позиционные допуски могут быть установлены для следующих геометрических элементов:

- точки (например, центра сферы);
- номинально прямой линии (например, оси отверстия или вала);
- номинально плоской поверхности (например, средней поверхности паза) [7].

Поле позиционного допуска располагается симметрично относительно теоретически точного месторасположения нормируемого элемента, задаваемого теоретически точными размерами [7]. Это требование соответствует положениям стандартов [3, 4], то есть позиционный допуск относится к производному элементу (точке, оси, линии).

Требование максимума материала распространяется не на производный элемент (точка, ось, линия), а на размерный элемент детали, что является новым и не может быть применено в производственной практике России по указанным выше причинам. При задании максимума материала контролировать требуется размерный элемент детали (отверстия, вала), а не положение производного элемента (позиционный допуск). Контроль максимума материала требует применения универсальных средств измерений, что удорожает производство изделия.

Пример из стандарта [8]: даны два отверстия $\varnothing 12^{+0,5}$ под болты М12, позиционный допуск, равный 0,3, указан с символом \textcircled{M} . Межосевое расстояние 30 указано в прямоугольной рамочке, что позволяет его считать теоретически точным (номинальным размером).

Трактуется этот символ как требование максимума материала и даны размеры отверстия: 12; 12,5; 11,7.

Реально у детали такого размера отверстия 11,7 быть не может по условию собираемости, однако он соответствует размеру калибра расположения, который должен входить в два отверстия при самом неблагоприятном их расположении [4].

Если рассматривать по ГОСТ Р 50056 символ \textcircled{M} как зависимый допуск, то производные элементы (оси отверстий) при размере $\varnothing 12$ (максимум материала), должны находиться в пределах окружности $\varnothing 0,3$; при наибольшем предельном размере $\varnothing 12,5$ центр отверстий может быть в окружности $\varnothing 0,8$ увеличен геометрический допуск на значение допуска отверстия. Действующий контур – цилиндр с диаметром 11,7 – относится к калибру расположения. Условие собираемости обеспечено.

Зависимые допуски используются также для допусков соосности, симметричности, перпендикулярности, пересечения осей, допуска прямолинейности оси и допуска плоскостности для плоскости симметрии. Контроль их выполняется в две ступени: первая – оценка годности заданного размера(ов) калибрами или измерительными инструментами, вторая – проверка геометрического допуска на собираемость калибрами расположения. Применение калибров расположения возможно только при задании зависимого допуска расположения [4].

Технологические преимущества зависимых допусков по сравнению с независимыми допусками четко сформулированы [3]. Они состоят, прежде всего, в том, что зависимые допуски позволяют применить менее точные, но более экономичные способы обработки и изготовления, а также снизить потери от брака.

Если поле технологического рассеивания отклонений расположения превышает значение допуска расположения (независимого или зависимого), то при зависимых допусках расположения доля годных деталей повышается по сравнению с независимыми допусками за счет:

- деталей, у которых отклонения формы и расположения превышают минимальное значение, но не превосходят действительное значение зависимого допуска;
- деталей, у которых отклонения формы и расположения хотя и превышают действительное значение, но не превосходят максимальное значение зависимого допуска.

Эти детали являются исправимым браком. Они могут быть дополнительно обработаны путем изменения размера в сторону к пределу минимума материала и признаны годными. Например, расточкой или развертыванием отверстий.

Если условие зависимого допуска распространяется на базу, то это позволяет упростить конструкцию базирующих элементов технологических приспособлений. Например, кондукторов и калибров. Их базирующие элементы могут быть выполнены не самоцентрирующими, а жесткими, с постоянным размером, соответствующим пределу максимума материала базы. Смещение базы детали из-за зазора между ней и базирующим элементом приспособления или калибра, возникающее при отклонении размера базы от предела максимума материала, в данном случае разрешается зависимым допуском расположения.

При зависимых допусках расположения изготовитель имеет возможность в случае необходимости увеличить (в технологической документации) минимальное значение зависимого допуска расположения за счет соответствующего сокращения поля допуска размера со стороны максимума материала. Зависимые допуски позволяют обоснованно применять калибры для контроля расположения (формы, координирующих размеров) по ГОСТ 16085, оценивающих годность детали по вхождению в нее. Принцип действия таких калибров полностью соответствует понятию о зависимых допусках.

При независимых допусках расположения применение калибров может оказаться невозможным. Независимые допуски формы и расположения поверхностей требуют применения универсальных или специальных средств измерения, например, координатно-измерительных машин и специальных контрольно-измерительных приспособлений. Это усложняет и удорожает производство таких изделий. Применять независимые допуски для неотчетственных соединений не рационально.

Выводы

1. Параллельное действие нескольких стандартов по одной тематике (ГОСТ 2.308-2011 и ГОСТ Р 53442-2011) затрудняет работу проектировщиков, а также отражается на работе технологических и производственных подразделений машиностроительных предприятий.

2. Термин «требование максимума материала» может быть применен в производственной практике России, если доказать его равноценность понятию «зависимый допуск» и использовать расчетные формулы ГОСТ Р 50056 -92 в ГОСТ Р 53090, согласовав условные обозначения и терминологию.

3. Сохранить термин «зависимый допуск», так как его применение снижает трудоемкость и себестоимость изделий крупносерийного и массового производства, когда требуется обеспечить только собираемость в неотчетственных соединениях.

4. Необходимо согласовывать требования вновь разработанных стандартов как между собой, так и с ранее выпущенными и действующими стандартами. Это пожелание службам Росстандарта. Требуется внести изменения в анализируемые стандарты [1, 2, 3, 4, 7, 8].

Библиографический список

1. ГОСТ 2.308-2011 ЕСКД. Указания допусков формы и расположения поверхностей. – М.: Изд-во стандартов, 2011.
2. ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО 1101:2004) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Изд-во стандартов, 2009.
3. ГОСТ Р 50056-92 ОНВ. Зависимые допуски формы, расположения и координирующих размеров. Основные положения по применению. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
4. ГОСТ 16085- 80 Калибры для контроля расположения поверхностей. Допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
5. ГОСТ 24642 ОНВ. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. – М.: Изд-во стандартов.

6. ГОСТ 2.307 -2011 ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений. – М.: Изд-во стандартов.
7. ГОСТ Р 53089-2008 (ИСО 5458:1998) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Установление позиционных допусков. – М.: Изд-во стандартов, 2008.
8. ГОСТ Р 53090-2008 (ИСО 2692:2006) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Требования максимума материала, минимума материала и взаимодействия. – М.: Изд-во стандартов, 2008.
9. ГОСТ 31254-2004 ОНВ. Геометрические элементы. Общие термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2004.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

V.N. Kaynova, E.M. Demyanovich

**THE ROLE OF THE TERM «QUALIFIED TOLERANCE » AFFECTS COST
REDUCTION AND LABOR CONTENT IN THE MANUFACTURING
OF IRRESPONSIBLE ASSEMBLY**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Analysis of ESKD standards and standards that defines geometric characteristics of products in relation of the term « qualified tolerance» which is widely used in production environment.

Methodology: Standards that determines one designation for two different terms « qualified tolerance » and «maximum material requirement» are examined. By analysis of clarifying standarts the explanation of the reasons for the differences and similarities of these terms is given.

Findings: It is needed to keep the term « qualified tolerance» as its use reduces prime cost and labor intensity in large scale and mass production when it is required to provide collection only.

Originality/value: Present research is an area of interest for higher educational institutions and production. It is required to amend the analyzed standards on the basis of the research [1, 2, 3, 4, 7, 8].

Key words: qualified tolerance, material maximum, geometric tolerance, irresponsible assembly, quality control, layout gauge, large scale manufacturing, cost, labor content.

УДК 621.9

С.А. Манцеров, И.В. Малинов

**СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОСТАВКАМИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается разработка архитектуры информационной системы анализа и организации работы логистической системы с оперативным отслеживанием и упорядочиванием производства за счёт снижения рисков остановок из-за перебоев с поставками. Предлагаемая для реализации модель информационной системы оперативного управления поставками представляет собой систему, в которой потребителю предоставляется возможность использования ресурсов (программного обеспечения) провайдера, работающего в облачной инфраструктуре посредством применения различных клиентских устройств или тонкого клиента, например, из браузера или через интерфейс программы.

Ключевые слова: облачные технологии, спутниковый мониторинг, just in time, система управления поставками.

В условиях России и стран СНГ с точки зрения логистики сложно организовать систему, работающую по строго определенной схеме. Причинами этого являются специфичность поставок на огромной территории страны, сложности, связанные с погодными условиями, таможенными службами и т.д. Даже крупные известные организации России по доставке грузов испытывают проблемы с задержками как при пересечении границ государств, так и непосредственно в процессе перевозки. Подобные проблемы могут быть связаны с недостатками организационной структуры системы поставок.

С ростом популярности концепции виртуального предприятия роль логистики на всём жизненном цикле продукции в настоящее время увеличивается. Многие предприятия работают по схеме разделения изготовления различных частей и сборки готового изделия ближе к месту реализации, что обусловлено экономическими факторами. Такая модель достаточно удобна и выгодна как производителю, так и потребителю, благодаря снижению конечной стоимости [1]. Поэтому представляет интерес создать такую информационную систему оперативного управления поставками (ИСОУП), которая позволила бы оперативно (в режиме реального времени) отслеживать перемещение материальных ценностей, проводить мониторинг положения транспортного средства, определять объем поставок, их периодичность, состояние и состав транспортного парка или договоров с транспортными компаниями и прочие условия.

Следует заранее оговорить, что подобная система не решит все проблемы, связанные с перевозкой материальных ценностей (МЦ). Задачами данной системы являются планирование и расчет требуемых объёмов складских запасов, определение периодичности поставок, отслеживание транспортных средств, выбор оптимального маршрута, сбор статистических данных и так далее, то есть повышение эффективности поставок и уменьшение расходов [2].

Существует система поставок товара, позволяющая обойтись без складов, основанная на построении точной системы расписания межоперационных доставок заготовок или товара just-in-time (JIT). Важное преимущество данной системы - гибкость и возможность сокращения складских издержек. Однако сразу возникает вопрос, связанный с взаимодействием с организацией-поставщиком. При условии проблем на его стороне пострадать может компания, использующая JIT. Это может приостановить производство, что повлечёт нарушение условий договоров с контрагентами предприятия и большие убытки. Повышение цен на транспорт и его организацию может привести к тому, что JIT окажется неэффективной си-

стемой. Вполне может оказаться, что доставлять МЦ большими партиями и хранить товар на складе будет выгоднее, чем организовать его периодическую поставку (эта система поставок зародилась в Японии, где географическая распределенность намного меньше, чем в России и странах СНГ). Также необходимо учитывать специфику комплектующих и их возможное техническое устаревание. Например, различные крепёжные элементы (винты, гайки) практически не меняют свою стоимость во времени, к тому же они настолько малы, что огромных складов может и не потребоваться. С другой стороны, различные электронные изделия, например, комплектующие для средств вычислительной техники постоянно совершенствуются и большие их запасы могут оказаться нерентабельными.

Однако есть возможности улучшить систему ЛТ даже при дальних поставках. Такой возможностью может быть система глобального отслеживания за передвижением товара, которая сможет выступить хорошим помощником для планирования производства.

Спутниковый мониторинг транспорта представляет собой систему слежения за перемещаемыми объектами, построенную на основе систем спутниковой навигации, оборудования и технологий сотовой и радиосвязи, вычислительной техники и цифровых карт. Спутниковый мониторинг транспорта может быть использован для решения задач транспортной логистики в системах управления перевозками и автоматизированных системах управления автопарком (рис. 1).



Рис. 1. Спутниковый мониторинг транспорта

Задача системы мониторинга заключается в отслеживании и анализе пространственных и временных координат транспортного средства. Возможны несколько вариантов мониторинга: *online* - с дистанционной передачей координатной информации и *offline* - информация считывается на контрольных точках, по прибытию на диспетчерский пункт. Стоит отметить, что при коротких поставках (к примеру, в пределах одного предприятия) достаточно *offline*-системы, тогда как при дальних поставках необходимо сопровождение на протяжении всего пути.

Установленный на транспортном средстве мобильный модуль, получая координатные данные от приёмника сигналов, записывает их в модуль хранения или сразу передаёт с помощью модуля передачи в систему мониторинга.

Использование системы мониторинга транспорта с помощью спутников позволяет решить следующие задачи:

- определение координат местоположения транспортного средства, его направления, скорости движения и других параметров (расход топлива, состояние транспорта и товара и др.). Системы спутникового мониторинга транспорта помогут водителю выбрать оптимальный маршрут с учётом дорожной ситуации;
- контроль соблюдения графика движения - учёт передвижения транспортных средств, автоматический учёт доставки грузов в заданные точки и др. Следует отметить такую актуальную на сегодняшний день проблему, как соблюдение режима работы водителей;
- сбор статистики и оптимизация маршрутов - анализ пройденных маршрутов, скоростного режима, расхода топлива транспортных средств, с целью определения лучших маршрутов и режимов движения;
- обеспечение безопасности - возможность определения местоположения помогает обнаружить угнанный автомобиль. В случае аварии система спутникового мониторинга помогает передать сигнал о бедствии в службы спасения. На основе спутникового мониторинга транспорта действуют некоторые системы автосигнализации.

Таким образом, используя передовые технологии, возможно использовать ИТ и при большом разбросе подразделений предприятия или удаленном расположении поставщиков. Однако для успешного управления и слежения за поставками потребуется чётко организованная система, которая позволит в режиме реального времени контролировать процесс поставок. Используя современные технологии, в частности облачные вычисления, можно реализовать подобную систему.

Постоянный рост стоимости ресурсов и, как следствие, попыток снижения издержек производства стал причиной географической распределенности некогда единых промышленных предприятий. В связи с этим резко возросли требования к телекоммуникационным систем, средствам обмена информацией и распределенным системам вычислений. Технология «облачных вычислений» (cloud computing), представляет собой развитие идеи о том, что мобильная команда справится с какой-либо задачей быстрее, чем несколько одиночек-специалистов. «Предками облаков» можно считать кластерные вычисления и grid-вычисления. Все эти технологии позволяют распределить обработку данных между несколькими машинами для того, чтобы ускорить ее выполнение и увеличить эффективность использования оборудования [3].

Современные промышленные предприятия широко используют информационные технологии в своей работе, но, как правило, вычислительные ресурсы имеющегося оборудования используются не полностью, программные средства на рабочих станциях дублируются, существуют трудности в управлении, а также тратится большое количество временных, материальных и трудовых ресурсов на поддержание работы всей ИТ-инфраструктуры и её обновление. Облачные вычисления имеют потенциал, обеспечивающий возможность устранения указанных недостатков.

Еще одним немаловажным преимуществом использования облачных вычислений на основе технологий виртуализации является возможность одновременной работы автоматизированных систем, разработанных для использования как под определенными аппаратными платформами, так и под различными программными средами (например, как в среде операционной системы (ОС) Linux, так и в среде ОС Windows компании Microsoft). Данное преимущество является очень важным уже сейчас и будет еще более значимым в будущем, так как наблюдается тенденция появления уникальных Linux-приложений, а также

бесплатных аналогов востребованных Windows-приложений, созданных для запуска в среде операционных систем Linux. Свободное программное обеспечение (СПО), к которому

относится и ОС Linux, позволяет решить вопросы безопасного и эффективного использования информационно-коммуникационных технологий, поэтому его поддержка выходит на первое место в приоритетах промышленных предприятий РФ. С другой стороны, существует огромное количество современных информационных систем, работающих исключительно в среде Windows. По этой причине сочетание ПО для Windows и Linux является целесообразным и актуальным.

Возможность использования информационных систем, работающих на других платформах (как программных, так и аппаратных), также может быть обеспечена. Особенно это актуально для стремительно развивающегося в настоящее время рынка мобильных устройств. Особенности работы «виртуальных предприятий» предполагают высокую степень мобильности сотрудников, то есть частые географические перемещения. Поэтому весьма востребован «мобильный» режим работы, когда пользователь может работать с привычным виртуальным рабочим столом, находясь далеко от местонахождения ИТ-инфраструктуры предприятия. Однако возможны проблемы, связанные с внедрением облачных технологий:

- конфиденциальность является одной из главных забот – злоумышленники могут проще получить данные, если они хранятся вне организации. При утечке информации вся технология оказывается нецелесообразной;
- осуществление контроля за лицензиями на ПО;
- данные хранятся и обрабатываются во множестве неустановленных местоположений, часто привлекаются другие неизвестные поставщики, вместе хранятся данные разных клиентов, вследствие чего теряется прозрачность общей структуры и усложняется управление информацией;
- надёжность каждого из облачных поставщиков, заключающаяся в гарантиях на непрерывность услуг, времени наработки до отказа и времени восстановления данных, может быть разной. Это значит, что услуги являются ненадежными для жизненно важных приложений;
- сложное соответствие законам и нормативам. Например, данные могут быть перенесены в другую страну, где ниже цена на электроэнергию и законы менее строгие. Точно так же, если услуги поставщика разбиты на элементы, предоставляемые на разных территориях, неизвестно, кто будет нести ответственность, если что-то выйдет из строя [3].

Выходом для промышленных предприятий, позволяющим устранить вышеперечисленные недостатки, является создание Private Cloud (Частного облака). Частным облаком называют облачную систему, созданную и эксплуатируемую только одной организацией, то есть создание единого информационного предприятия (ЕИП) на основе облачных технологий (рис. 2).

Создание ЕИП на предприятии является весьма сложной задачей, решение которой необходимо осуществлять в соответствии с современными стандартами управления жизненным циклом изделия. Построение ЕИП производится в соответствии с концепцией CALS, согласно которой необходимо автоматизировать информационную поддержку всех этапов жизненного цикла изделия. Очень важной стратегией развития современного ЕИП предприятия является включение в его состав интеллектуальных подсистем, обеспечивающих поддержку принятия решений. В связи с этим к составу и структуре ЕИП предъявляются качественно новые требования, затрагивающие как функциональность всех компонентов программного обеспечения, так и методики работы с ними. Поскольку ЕИП содержит всю информацию, необходимую для поддержки принятия решений, а современные решения все чаще должны приниматься коллегиально в результате совместной обработки актуальных данных группой лиц, целесообразно обеспечить взаимодействие лиц, принимающих решения, также средствами ЕИП предприятия. Это означает, что, помимо интеграции информационных ресурсов, необходимо реализовать такую функциональность, которая позволила бы согласованно принимать решения в процессе удаленного взаимодействия между удаленными

лицами в процессе обработки данных. В частности, именно на обеспечение эффективного взаимодействия ориентированы новейшие разработки в области автоматизации управления жизненного цикла изделия и конструкторско-технологической подготовки производства.

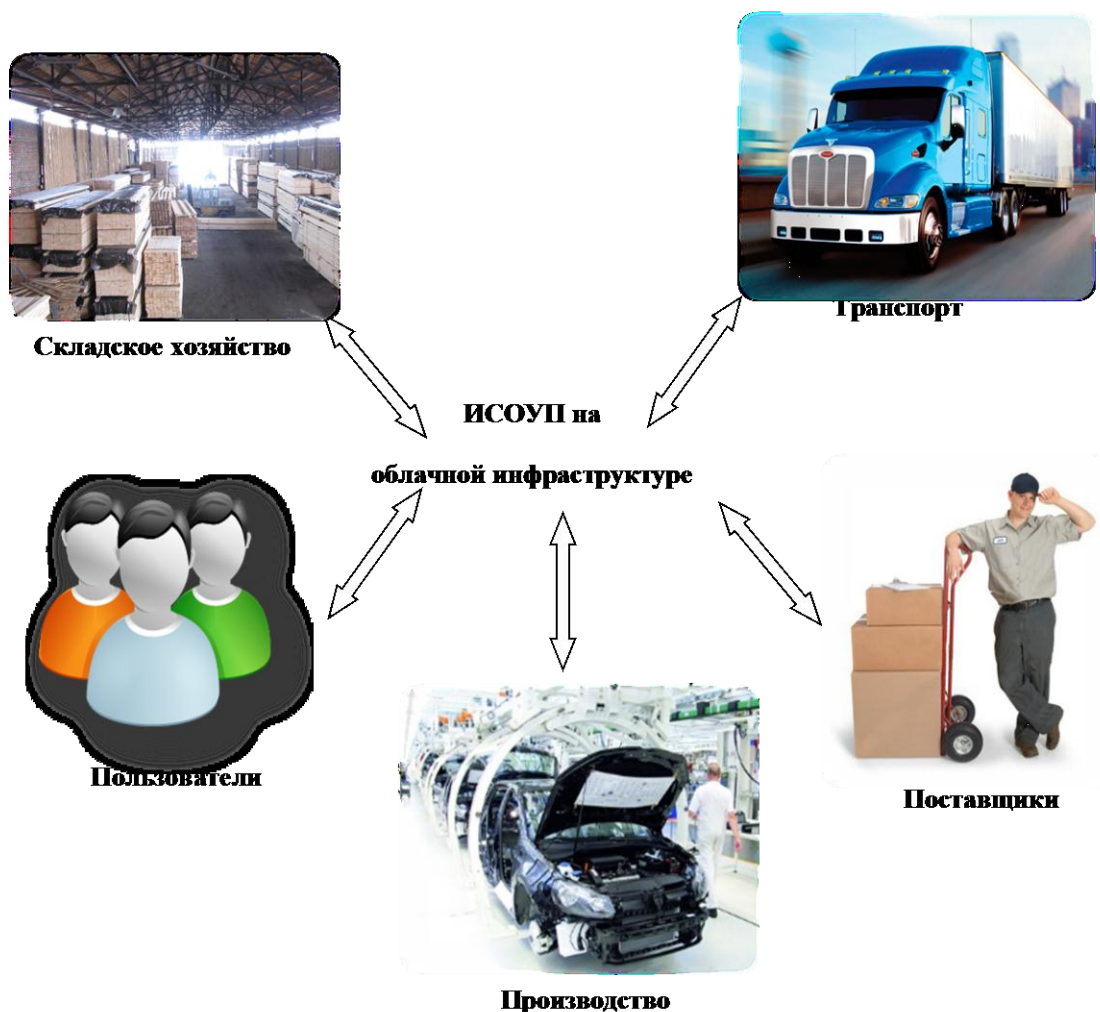


Рис. 2. Информационное пространство ИСОУП

Предлагаемая для реализации в ИСОУП модель - программное обеспечение как услуга (Software as a Service SaaS), представляет собой систему, в которой потребителю предоставляется возможность использования ресурсов (программного обеспечения) провайдера, работающего в облачной инфраструктуре посредством применения различных клиентских устройств или тонкого клиента, например, из браузера или через интерфейс программы. Такой выбор обусловлен многими обстоятельствами. Эта модель потребует минимальных материальных и интеллектуальных затрат, в отличие от организации достаточно большой и сложной структуры на территории предприятия. В частности, экономия будет заметна за счёт снижения затрат на закупку и резервирование оборудования, на электроэнергию и охлаждение, лицензирование и развёртывание новых сервисов. Таким образом, затраты будут оптимизированы согласно с потребностями предприятия, которые к тому же возможно как увеличить, так и уменьшить. Одновременно с этим повышается уровень безопасности данных и надёжность их сохранения. Также одно из главных преимуществ такой модели – мобильность её использования. То есть, сотрудники смогут работать в системе не только со своего рабочего места, но и посредством мобильных устройств, работающих под управлением OS Android, Windows и iOS.

Доступ к ИСОУП защищён посредством системы аутентификации каждого пользова-

теля, у которого имеется доступ только к информации, необходимой ему для работы. Таким образом, разграничение доступа к информации облегчает контроль над полномочиями сотрудников и помогает формировать иерархическую структуру данных.

Данная ИСОУП развивает функционал концепции MRP-II (Manufacture resource planning), главная идея которой заключается в наличии нужной учетной единицы в нужное время и в нужном месте. Функционал ее заключается в планировании потребностей производства в материальных ресурсах, кадрах и финансах. Это производится путём сбора и анализа информации о структуре и технологиях производства, о календарном плане, о складах, договорах с поставщиками и потребителями, спросе на каждый продукт, конкурентах и общей ситуации на рынке.

Перечисленные технологии, интегрированные в ИСОУП, позволяют прогнозировать поступления материалов и комплектующих, оптимизировать работу складов, уменьшать ошибочные поставки и упорядочить производство посредством контролирования всего цикла использования материала от заказа до использования в готовом изделии.

Таким образом, ИСОУП не лишает ИТ недостатков, связанных с перевозкой товара на дальние расстояния, но она способна значительно снизить риски приостановки производства или продаж и позволить собирать статистические данные, благодаря которым появляется возможность проводить анализ логистической деятельности и устранять «узкие места» системы поставок МЦ.

Библиографический список

1. **Бреховских, С.М.** Функциональная компьютерная систематика материалов, машин, изделий и технологий / С.М. Бреховских, А.П. Прасолов, В.Ф. Солинов. – М.: Машиностроение, 1995. – 551 с.
2. **Манцеров, С.А.** Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2007. Т. 3. № 11. С. 171–176.
3. **Манцеров, С.А.** Структурная систематика единого информационного пространства машиностроительного кластера / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2008. Т. 4. № 1. С. 37–42.
4. **Волгин, А.В.** Создание единого информационного пространства машиностроительного предприятия на основе облачных технологий / А.В. Волгин [и др.] // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2012. Т. 8. № 6. С. 44–47.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

S.A. Mantserov, I.V. Malinov

CREATING A SYSTEM OF OPERATIONAL MANAGEMENT OF DELIVERY USING CLOUD COMPUTING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alexeev

Purpose: Development of architecture of information system of analysis and organization of the logistics system with operational tracking and ordering production by reducing the risk of stops because of supply disruptions.

Methodology: System analysis, information modeling, cloud computing.

Originality/value: System can be used in every logistic system.

Key words: cloud computing, satellite monitoring, just in time, supply management system.

УДК 532.528:539.4

В.Ю. Шестоперов

КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КРИТЕРИИ
ОЦЕНКИ ИХ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Цель работы – разработка критериев оценки эрозионной стойкости материалов конструкций, работающих в кавитирующей жидкости, с целью рационального их выбора как одного из методов борьбы с этим негативным явлением. Рассмотрен процесс образования и развития кавитационной эрозии. Описаны феноменологическая модель эрозионных повреждений, основанная на понятии разрыхления металла в очаге повреждения, а также модель развития кавитационной эрозии. Предложены критерии оценки эрозионной стойкости материалов с целью их рационального выбора. Проведена апробация этих критериев на ряде конструкционных материалов.

Разработанные критерии оценки позволяют более обоснованно осуществить такой выбор по сравнению с традиционным по потерям массы материала, поскольку они точнее учитывают физику процесса.

Ключевые слова: кавитация, разрушение материалов, эрозионная стойкость, критерии оценки.

Элементы многих конструкций и устройств часто работают в условиях кавитирующей жидкости (движительные рулевые комплексы судов, крыльевые устройства судов с динамическими принципами поддержания, детали насосов, двигателей, подшипников, топливной аппаратуры и др.), подвергаясь интенсивной эрозии [1, 2]. Конструктивно-эксплуатационные методы борьбы с их кавитационным разрушением (ограничение режимов эксплуатации, сверление противоэрозионных отверстий и т.п.) зачастую не дают желаемого результата. В этих условиях рациональный выбор конструкционного материала во многом способствует успешной борьбе с этим негативным явлением. Этот выбор связан с необходимостью определения их эрозионной стойкости по критериям оценки. Установлено [1, 2], что главной причиной кавитационной эрозии металлических поверхностей является схлопывание вблизи них кавитационных пузырьков. При этом кинетика процесса разрушения материала описывается кривой эрозии (потерь массы или объема во времени), на которой, как при процессе усталости, выделяют стадии образования и развития эрозионных повреждений (рис. 1).



Рис. 1. Кривая кавитационной эрозии:

I – инкубационный период; II, III – периоды кавитационного упрочнения и разупрочнения

Традиционным критерием эрозионной стойкости материала служат потери его массы (объёма) за определённый период времени. Этот критерий не учитывает условия нагружения, физику процесса и свойства материала.

В работе [3] на основе рассмотрения квазистатистического детерминирования воздействия на поверхность материала схлопывающихся кавитационных пузырьков построена феноменологическая модель процесса эрозии на стадии инкубационного периода, основанная на понятии деформационного разрыхления, введенного впервые В. В. Новожиловым [4] и используемая в дальнейшем в работах В. М. Волкова [5]. При схлопывании в точке O над поверхностью кавитационных пузырьков на расстоянии r_0 от неё (рис. 2) на ней образуется пластический кратер a с пластическим ядром d под ним. Критическое разрыхление θ_* , приводящее к образованию очага разрушения глубиной z_* , образуется за время инкубационного периода t_* после схлопывания критического числа N_* пузырьков. При этом объём повреждённого и удаляемого из кратера материала будет пропорционален z_*^3 .

Величина z_* определяется по выражению

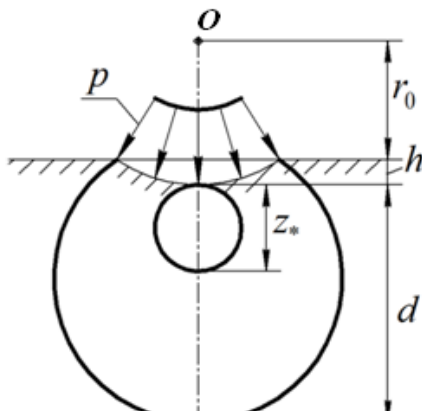


Рис. 2 Очаг повреждения при кавитационной эрозии: p – давление при схлопывании пузырьков

$$z_* = d_* \left\{ 1 - \frac{1}{\gamma_*} \ln \left[\left(\frac{C_0}{\lambda_T^s} \right)^{\frac{1}{s}} + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где γ_* – значение параметра γ при $N_*=1$; γ – параметр, связанный с размерами ядра d и глубиной кратера; d_* – значение d при $N_*=1$; C_0 – постоянная Л. Коффина; $\lambda_T = 0,002$; s – постоянная материала ($s=2$ в случае линейного упрочнения). Предлагаемая модель образования эрозионных повреждений учитывает упругие, пластические и циклические свойства материала и позволяет определить продолжительность инкубационного периода эрозии для циклически разупрочняющегося, упрочняющегося и стабильного материалов соответственно.

$$t_* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{s\beta} \ln \left[1 + s\beta \frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right] \right\},$$

$$t_* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{w} \left[\frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

$$t_* = \tau \frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s},$$

где $w = (1 - s\varphi)^{-1}$; φ , β – коэффициенты интенсивности циклического упрочнения и

разупрочнения. В выражениях (2) τ определяется конкретным типом и процессом кавитации в жидкости. Для его определения необходимо исследовать процесс с позиций гидромеханики. Чтобы оценить кавитационную стойкость материала на стадии образования эрозионных повреждений в качестве критерия используем параметр $\bar{R}_* = \frac{E_t N_*}{z_*^3}$ [6], в котором E_t - энергия, поглощенная в очаге эрозии при схлопывании пузырька. Этот параметр адекватен удельной энергии, поглощённой в единице объёма удаляемого материала за время инкубационного периода.

Для описания стадии развития эрозионных повреждений используем соотношение К. Стеллера [7] о балансе работы внешних сил и произведённой работы при постоянстве мощности, затрачиваемой на разрушение:

$$RV = Pt, \tag{3}$$

где V – эрозионные потери объёма материала за время t ; R – удельная поглощённая в объёме энергия (сопротивление металла эрозии); P – мощность, затрачиваемая на разрушение. Если задаться законами изменения сопротивления R эрозии на стадии развития эрозионных повреждений, как состоящей из периодов упрочнения и разупрочнения, соответственно в виде [3]

$$\begin{aligned} R &= R_* + A(t - t_*)^\alpha, \\ R &= R_g \left[1 + \frac{1}{k} e^{\kappa_p(t - t_u)} \right], \end{aligned} \tag{4}$$

то получим выражения, описывающие процесс эрозии в периоды упрочнения и разупрочнения соответственно:

$$\begin{aligned} V &= V_* + A_1(t - t_*)^{1-\alpha}, \\ V &= V_u + \frac{C_1(t - t_u)}{1 + \frac{1}{k} e^{-\kappa_p(t - t_u)}}, \end{aligned} \tag{5}$$

В формулах (3) и (4) R_* , V_* - сопротивление металла эрозии и первоначальные потери объёма в конце инкубационного периода; A , A_1 , C_1 – постоянные; α , κ_p – коэффициенты кавитационного упрочнения и разупрочнения; k – коэффициент запаса сопротивления металла эрозии; t_u , V_u – продолжительность периода упрочнения и потери в конце его (рис. 1); R_g – значение R при $t \rightarrow \infty$. Для оценки эрозионной стойкости материалов на стадии развития кавитационных повреждений предлагается параметр [6]

$$\bar{\delta} = \frac{1}{P(t - t_*)} \int_{t_*}^t R dt. \tag{6}$$

Использование выражения (6) с учетом зависимостей (4) в предположении, что $t_u \gg t^*$, $V_u \gg V^*$, $t \gg t^*$, позволяет получить формулы для определения $\bar{\delta}$ в периоды упрочнения и разупрочнения соответственно в виде

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{\alpha}{1 - \alpha} + \frac{\alpha}{1 + \alpha} \left(\frac{t}{t_u} \right)^\alpha \right], \\ \bar{\delta} &= \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{1 + \alpha^2}{1 - \alpha^2} \left(\frac{t_u}{t} \right) + \frac{k}{(1 + k)(1 - \alpha)} \left(1 - \frac{t_u}{t} \right) + \frac{1 - e^{-\kappa_p(t - t_u)}}{\kappa_p t (1 - \alpha)(1 + k)} \right]. \end{aligned} \tag{7}$$

Указанные критерии \bar{R}_* и $\bar{\delta}$ апробировались на конструкционных сплавах Д16АТ, АМгб1гк, АМгАМ, Д1АТ, К48-2Т1, Д19АМ, Л63 и 12Х18Н10Т. При этом исследуемые материалы выстроены в ряд кавитационной стойкости [6]. Кривые кавитационной эрозии для этих материалов были получены экспериментально на ультразвуковой кавитационной установке [8]. Наряду с этими критериями проведена и широко используемая традиционная

оценка по потерям массы. Положение материалов в рядах оказалось различным. Однако следует отметить, что оценка по рассмотренным критериям, по мнению автора является более объективной, поскольку в них учитывается комплекс механических свойств материалов (упругих, пластических, прочностных, циклических и трещиностойкость).

Зависимости (5), описывающие развитие эрозионных повреждений во времени, получены в предположении постоянства мощности P , затрачиваемой на разрушение. Однако в период разупрочнения, особенно при $t \gg t_u$, жидкость, заполняя глубокие кавитационные раковины, начинает оказывать буферное действие [1]. Поэтому логично положить уменьшение P , которое выразим зависимостью

$$P_t = P e^{-\chi(t-t_u)}, \quad (8)$$

где χ - постоянная. Тогда, записывая работу внешних сил как

$$E_p = \int_{t_u}^t P_t dt, \quad (9)$$

из уравнения баланса работ для периода кавитационного разупрочнения получим выражение для эрозионных потерь объёма материала в указанном периоде

$$V = V_u + \frac{c_1}{\chi} \frac{1 - e^{-\chi(t-t_u)}}{1 + \frac{1}{k} e^{-\kappa_p(t-t_u)}}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) как частный случай при $\chi = 0$ следует вторая зависимость в выражениях (5).

На рис. 3 показана кривая кавитационной эрозии с учётом описанного уравнением (10) процесса затухания.

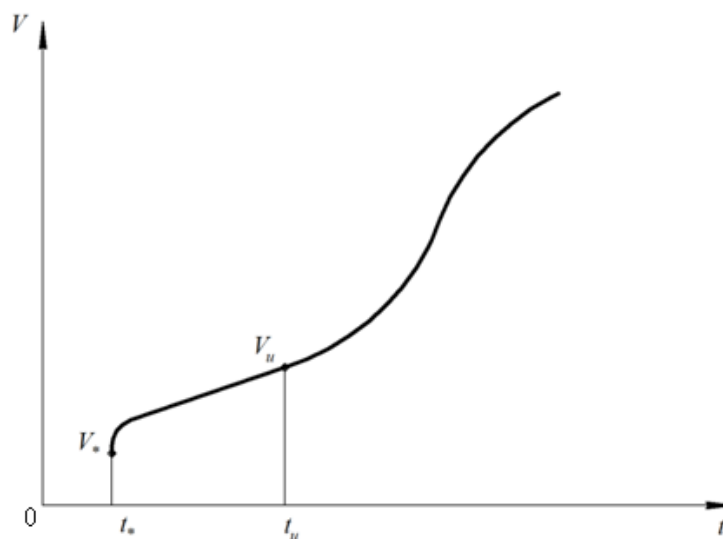


Рис. 3. Кривая кавитационной эрозии с учётом буферного действия жидкости в очаге эрозии

Кавитационное воздействие является случайным микроударным процессом, поэтому эрозионная стойкость сплавов будет определяться их структурными составляющими, свойствами зерен, строением тонкой структуры. Описанные выше модели процесса эрозии этого не учитывают. Следует также учитывать и вероятностную природу процесса. Остается открытым вопрос о внешних силах кавитационного воздействия.

Библиографический список

1. **Козырев, С.П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.

2. Георгиевская, Е.П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.П. Георгиевская. – Л.: Судостроение, 1978. – 208 с.
3. Волков, В.М. Сопротивление элементов металлических конструкций кавитационному разрушению / В.М. Волков, В.Ю. Шестоперов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз сб. – Горький: ГГУ, 1982. С. 51–59.
4. Новожилов, В.В. О пластическом разрывлении // ПММ. 1965. Т. 29. №4. С. 75–83.
5. Волков, В.М. Феноменологический анализ мало-и многоциклового усталости металлов // Тр. ГПИ им. А.А. Жданова. 1974. Т. 30. Вып. 13.
6. Шестоперов, В.Ю. Разрушение материалов и тонкостенных элементов конструкций в условиях воздействия кавитирующей жидкости // Надежность и механика разрушения судовых конструкций: межвуз. сб. научн. тр. – Горький: ГПИ, 1990. С. 61–67.
7. Шестоперов, В.Ю. Экспериментальное исследование кавитационной эрозии судостроительных материалов // Теория и прочность ледокольного корабля. – Горький: ГПИ, 1980. С. 57–60.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

V. Yu. Shestoperov

CAVITATION DAMAGE OF MATERIALS AND CRITERIA FOR ASSESSING THE EROSION RESISTANCE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The assessment criteria development of erosion resistance of structure material, working of cavitating fluid and addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework considers cavitation erosion generation and developing. The study characterizes phenomenological model of cavitation damage generation, based on conception of material shattering in a damage site and model of cavitation erosion developing.

Findings: Developed assessment criteria allow more reasonable choice of material in comparison with traditional mass loss criteria, as they more accurately takes into account physics of the process.

Research limitation/implications: The present study provides a starting point for further research in assessment criteria of material cavitation erosion resistance.

Originality/value: Developed assessment criteria are experimentally approbated on a series of constructional materials.

Key words: cavitation, damage of materials, erosion resistance, criteria for assessing.

УДК 621.833

А.Н. Петровский

К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЗАЦЕПЛЕНИЯ М.Л. НОВИКОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

Задача оптимизации сформулирована как система условий существования и качества рабочего и стачных зацеплений. Численное решение получено в виде трехмерного массива безразмерных параметров и расчетных величин для возможных чисел зубьев шестерни и колеса 150×150. Оптимизированные параметры обеспечивают максимальную нагрузочную способность, регламентируемую расчетами на прочность. Приводится сравнение оптимизированных зацеплений М.Л. Новикова с оптимизированными эвольвентными зацеплениями.

Ключевые слова: зацепление Новикова, зубчатые передачи, редукторы, двухпозиционный обкат, нагрузочная способность, конкурентоспособность, прочность.

Доктор технических наук, инженер-полковник Михаил Леонтьевич Новиков за создание зубчатых передач с новым зацеплением был удостоен государственной Ленинской премии 1959 г. В списке лауреатов он занимает достойное место рядом А.П. Александровым, Н.Г. Басовым, А.М. Прохоровым, В.И. Векслером, С.П. Митрофановым, В.П. Соловьевым-Седым, А.И. Хачатуряном и другими выдающимися современниками, творчество которых стало символом отечественной науки и культуры.

В короткий период зацепление М.Л. Новикова получило распространение в редукторах грузоподъемных и технологических машин, где условия эксплуатации предусматривают длительные ресурсы при умеренных требованиях к размерам и массе. В этом случае удачное сочетание гидродинамики и приработки зацепления обеспечивает необходимую нагрузочную способность без затрат на химико-термическое упрочнение и шлифование.

Хорошая технологичность и сегодня поддерживает конкурентоспособность зацепления М.Л. Новикова, однако современные требования к нагрузочной способности передач, уровням их вибрации и шума стимулируют поиск новых возможностей улучшения.

Применение зацепления М.Л. Новикова, как правило, связано с оценкой его эффективности относительно эвольвентного зацепления. Результаты, вероятно первого, экспериментального сравнения были опубликованы М.С. Колодкиным в 1960 г. [1], но интерес к теме и острые дискуссии не угасают [2, 3].

В работах [4, 5] мы предприняли попытку аналитического сравнения зацеплений по критерию удельной нагрузочной способности. Сравнение зацеплений М.Л. Новикова с исходным контуром по ГОСТ 15023-76 и эвольвентных зацеплений с оптимизированными геометрическими параметрами было выполнено на массиве наиболее применяемых чисел зубьев сопряженных колес 150×150. Оказалось, что зацепление М.Л. Новикова имеет область превосходства в передачах, лимитируемых контактной прочностью при небольшом числе зубьев шестерни (до 13 ... 16), и уступает эвольвентному зацеплению в передачах, лимитируемых прочностью зубьев на изгиб.

Согласившись с оппонентами, что сравнение будет объективнее при оптимизации каждого из зацеплений, автор поставил задачу оптимизации их геометрических параметров по единой методике. В статье [6] представлены основные положения конструктивно-технологической оптимизации геометрических параметров эвольвентного зацепления, показатели нагрузочной способности, методика и пример проектного расчета. Задача конструктивно-технологической оптимизации геометрических параметров зацепления М.Л. Новикова приводится далее в такой же последовательности.

Конструктивно-технологический подход включает совместный синтез рабочего и ста-

ночных (технологических) зацеплений на основе анализа удельных показателей нагрузочной способности [4, 5, 6], условий существования и качества. Другая технологическая особенность этого подхода – двухпозиционный обкат заготовок универсальным исходным производящим контуром (ИПК) с постоянными параметрами [7]. По этой технологии в первой позиции обката образуют боковые профили одной стороны зубьев. Необходимую толщину зубьев обеспечивают настройкой второй позиции обката за счет тангенциального или углового смещения ИПК и/или заготовки (рис. 1). Обкатом во второй позиции образуют боковые профили противоположной стороны зубьев. Позиции ИПК задают радиальным x и тангенциальным y смещениями (рис. 2). Подбором смещений исключают эффекты подрезания, заострения, интерференции и сокращения толщины зубьев. По своим результатам двухпозиционный обкат аналогичен обкату ИПК с переменной толщиной выступа. Для улучшения формы зубьев и качества поверхностей можно применить и многопозиционный обкат.

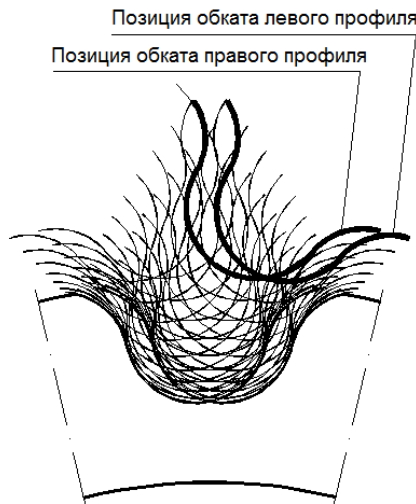


Рис. 1. Двухпозиционный обкат

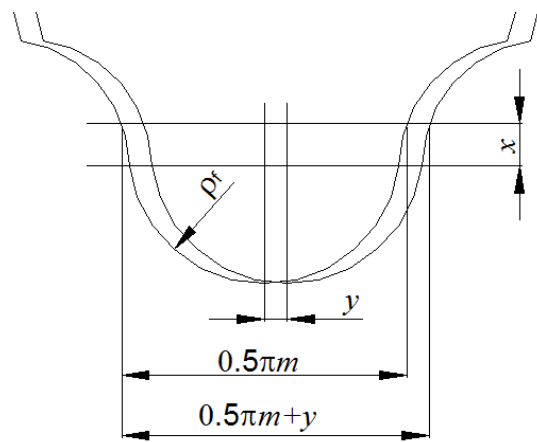


Рис. 2. Смещения ИПК

В качестве обобщенного критерия качества зацепления цилиндрических зубчатых колес принят показатель удельной нагрузочной способности [5, 6]

$$t = \frac{T_1}{V} = \frac{T_1(u+1)^2}{\pi a_w^2 b_w (u^2+1)} = \frac{T_1}{\pi r_{w1}^2 b_w (u^2+1)}, \quad (1)$$

где t – удельная нагрузочная способность, МПа; T_1 – вращающий момент на шестерне, Нм; V – сумма объемов начальных цилиндров сопряженных зубчатых колес на рабочей ширине зацепления, м³; a_w – межосевое расстояние, м; b_w – рабочая ширина зацепления, м; r_{w1} – радиус начального цилиндра шестерни, м.

Обобщенный критерий численно равен средней энергии упругой деформации, приходящейся на единицу объема начальных цилиндров, имеет размерность напряжения и применяется для построения целевых функций и ускоренного проектного анализа.

Для зацепления М.Л. Новикова главные целевые функции получены из расчетных формул В.Н. Кудрявцева [8, 9] и приводятся с обозначениями ГОСТ 21354-87:

$$t_{H1,2} = \left(\frac{\sigma_{H \lim 1,2}^2}{Z_E^2 S_{H1,2}^2 K_H} \right) \left(\frac{\Theta K_{\text{комт}} K_\varepsilon K_z \cos \alpha_w \cos^{1.5} \beta}{\pi \varepsilon_\beta z_1^{0.5} \sin^{0.5} \alpha_w} \right) \left(\frac{u^{0.5}}{\pi(u^2+1)(u+1)^{0.5}} \right) = q_{H1,2} \frac{\gamma_H}{v_H}; \quad (2)$$

$$t_{F1,2} = \left(\frac{\sigma_{F \lim 1,2}^0}{S_{F1,2} K_F} \right) \left(\frac{2 K_\varepsilon K_\rho \text{tg} \beta \cos^3 \beta}{\pi z_1 \varepsilon_\beta Y_{FS1,2}} \right) \left(\frac{1}{\pi(u^2+1)} \right) = q_{F1,2} \frac{\gamma_{F1,2}}{v_F}; \quad (3)$$

где H – индекс условий контактной прочности; F – индекс условий прочности на изгиб; 1 – индекс шестерни; 2 – индекс колеса; Θ – безразмерная эмпирическая величина; $\sigma_{H \lim}$ – предел контактной выносливости поверхностей зубьев, соответствующий базовому числу цик-

лов напряжений, МПа; σ_{Flimb}^0 – предел выносливости зубьев при изгибе, соответствующий базовому числу циклов напряжений, МПа; Z_E – показатель, учитывающий механические свойства материалов колес (МПа)^{0.5}; $K_{\text{конт}}$ – коэффициент, учитывающий форму ИПК; K_ε – коэффициент, учитывающий число мест контакта в зацеплении, K_ε – коэффициент, учитывающий влияние геометрии мест соприкосновения на прочность при изгибе; K_z – коэффициент, учитывающий сочетание зубьев; K_H – сводный коэффициент нагрузки для контактных напряжений; K_F – сводный коэффициент нагрузки для напряжений изгиба; S_H – сводный коэффициент безопасности по напряжениям контакта; S_F – сводный коэффициент безопасности по напряжениям изгиба; Y_{FS} – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений; z – число зубьев; u – передаточное число; α_k – угол профиля в точке контакта пары ИПК; α_w – угол зацепления; β – угол наклона зубьев на делительном цилиндре; ε_β – коэффициент осевого перекрытия.

В больших скобках главных целевых функций (2), (3) сгруппированы физические, статистические, геометрические и структурные величины. Они образуют автономные целевые функции: допускаемых напряжений q_{H12} , q_{F12} ; зацепления γ_H , $\gamma_{F1,2}$ и структуры ν_H , ν_F . Функции γ_H , ν_H , ν_F общие для шестерни и колеса. Функции зацепления и структуры безразмерные. Их отношение – функция формы – характеризует геометрические свойства зацепления. Функции допускаемых напряжений и функции структуры для условий прочности на изгиб у зацепления М.Л. Новикова и эвольвентного зацепления совпадают.

Лимитирующая нагрузочная способность зацепления определяется наименьшим из показателей (2), (3):

$$t = \text{MIN}(t_{H1,2}; t_{F1,2}) = q \frac{\gamma}{\nu}. \quad (4)$$

Обозначения лимитирующих функций здесь и далее применяются без индексов.

Очевидно, что каждой методике расчета на прочность соответствуют свои варианты целевых функций. Второй вариант главной целевой функции для условий контактной прочности получим из классического решения Г. Герца для максимального давления между соприкасающимися упругими телами [10]:

$$q_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab}, \quad (5)$$

где P – нагрузка, Н; a , b – большая и малая полуоси эллиптической площадки контакта, м:

$$a = \lambda \sqrt[3]{\frac{3P\rho}{2\pi Z_E^2}}, \quad (6)$$

$$b = \mu \sqrt[3]{\frac{3P\rho}{2\pi Z_E^2}}, \quad (7)$$

где λ и μ – безразмерные функции радиусов кривизны в начальной точке контакта; ρ – приведенный радиус кривизны, м.

Для удобства практических расчетов из соотношений и таблиц [10] получены аппроксимирующие выражения:

$$\lambda = 1.375\theta^2 - 4.419\theta + 4.596, \quad (8)$$

$$\mu = 0.475\theta + 0.231, \quad (9)$$

$$\theta \approx \arccos\left(\frac{u-1}{u+1}\right). \quad (10)$$

Формула (10) получена из известного выражения для вспомогательного угла θ при условии совпадения профильных радиусов кривизны сопрягаемых зубьев в приработанном контакте.

В качестве расчетного используется эквивалентное напряжение σ_e в центре эллиптической площадки контакта, которое, согласно энергетической (четвертой) теории прочности

[11], является функцией отношения полуосей эллиптической площадки контакта и аппроксимировано формулой

$$\sigma_e = q_0(0.083\theta^2 - 0.285\theta + 0.441).$$

Допускаемое эквивалентное $[\sigma_e]$ напряжение первоначально точечного контакта можно представить через известные пределы контактной выносливости материала на средней линии прямоугольной площадки контакта цилиндрических тел [11, 12]

$$[\sigma_e] = \frac{0.4\sigma_{H\lim 1,2}}{S_{H1,2}},$$

и перейти к условию контактной прочности по эквивалентным напряжениям

$$[\sigma_e] = \frac{0.4\sigma_{H\lim 1,2}}{S_{H1,2}} \geq q_0(0.083\theta^2 - 0.285\theta + 0.441). \quad (11)$$

Из (6), (7), (11) получим формулу для допускаемого вращающего момента на шестерне:

$$T_1 = \frac{2}{3}\pi \frac{\sigma_{H\lim 1,2}^3 K_{IV}}{Z_E^4 S_{H1,2}^3 K_H} K_\varepsilon \lambda^3 \mu^3 \rho^2 r_{w1} \cos \alpha_w \cos \beta, \quad (12)$$

где K_{IV} – безразмерный коэффициент критерия (теории) прочности:

$$K_{IV} = 0.4^3 (0.083\theta^2 - 0.285\theta + 0.441)^{-1}$$

С учетом (12) и известных выражений

$$b_w = \frac{2\pi\varepsilon_\beta}{z_1 \operatorname{tg} \beta} r_{w1}, \quad (13)$$

$$\rho \approx \left(\frac{r_{w1} u}{\sin \alpha_w \sin^2 \beta (u+1)} \right) \quad (14)$$

приведем главную целевую функцию (1) к виду

$$t_{H1,2} = \left(\frac{\sigma_{H\lim 1,2}^2}{Z_E^2 S_{H1,2}^2 K_H} \right) \left(\frac{\sigma_{H\lim 1,2} K_{IV}}{Z_E S_{H1,2}} \times \frac{z_1 K_\varepsilon \cos \alpha_w}{3\varepsilon_\beta \sin^2 \alpha_w \sin^3 \beta} \right) \left(\frac{\lambda^3 \mu^3 u^2}{\pi(u^2 + 1)(u+1)^2} \right) = q_{H1,2} \frac{\gamma_H}{v_H}. \quad (15)$$

Относительные размеры полуосей a и b в долях торцового модуля следуют из соотношений (6), (7) и (12):

$$a^* = \left(\frac{\sigma_{H\lim 1,2} \sqrt[3]{K_{IV}}}{Z_E^2 S_{H1,2} \sqrt[3]{K_H}} \right) \left(\frac{z_1 \cos \alpha_k}{2 \sin \alpha_w \sin^2 \beta \cos \alpha_w} \right) \left(\frac{\lambda^2 \mu u}{(u+1)} \right), \quad (16)$$

$$b^* = \left(\frac{\sigma_{H\lim 1,2} \sqrt[3]{K_{IV}}}{Z_E^2 S_{H1,2} \sqrt[3]{K_H}} \right) \left(\frac{z_1 \cos \alpha_k}{2 \sin \alpha_w \sin^2 \beta \cos \alpha_w} \right) \left(\frac{\lambda \mu^2 u}{(u+1)} \right). \quad (17)$$

Второй вариант главной целевой функций для условий прочности на изгиб получим из расчетной формулы А.С. Яковлева [12, 13, 14]:

$$\sigma_{F1,2} = \frac{2T_1}{z_{1,2} K_\varepsilon m^3} Y_{V1,2} Y_{Fa} Y_\varepsilon K_F, \quad (18)$$

где Y_{Fa} – коэффициент протяженности площадки контакта; $Y_{V1,2}$ – объемный коэффициент формы зуба.

Из (1) и (18) следует

$$t_{F1(2)} = \left(\frac{\sigma_{F\lim b1(2)}^0}{S_{F1,2} K_F} \right) \left(\frac{2K_\varepsilon \operatorname{tg} \beta \cos^3 \beta}{\pi_1 \varepsilon_\beta z_1 Y_{V1,2} Y_{Fa}} \right) \left(\frac{1}{\pi(u^2 + 1)} \right) = q_{F1,2} \frac{\gamma_{F1,2}}{v_F}. \quad (19)$$

Сходимость вариантов целевых функций будем оценивать их отношением. Для условий контактной прочности отношение целевых функций (2), (15)

$$\delta_H = \left(\frac{Z_E^2 S_{H1,2}}{\sigma_{H \lim 1,2} K_{IV}} \times \frac{3\Theta K_{\text{конт}} K_z \sin^{1.5} \alpha_w \sin^3 \beta \cos^{1.5} \beta}{\pi z_1^{1.5}} \right) \left(\frac{(u+1)^{1.5}}{\lambda^3 \mu^3 u^{1.5}} \right). \quad (20)$$

Зависимость отношения δ_H от передаточного числа u и чисел зубьев шестерни z_1 представлена на диаграмме рис. 3. Из диаграммы видно, что целевые функции имеют удовлетворительную сходимость лишь при малых числах зубьев и передаточном числе, близком к единице, а их расхождение обусловлено тем, что функция (15) учитывает рост нагрузочной способности зацепления с увеличением z_1 и u .

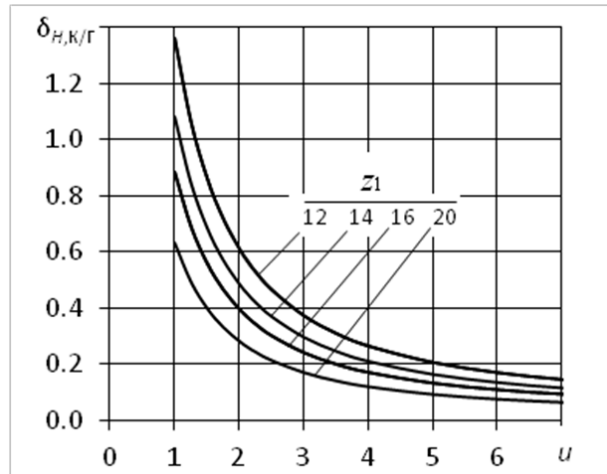


Рис. 3. Отношение целевых функций, полученных из формул В.Н. Кудрявцева и Г. Герца
($\Theta=5.05$; $\beta=20^\circ$; $\sigma_{H \lim 1,2}/S_1 = 500$ МПа)

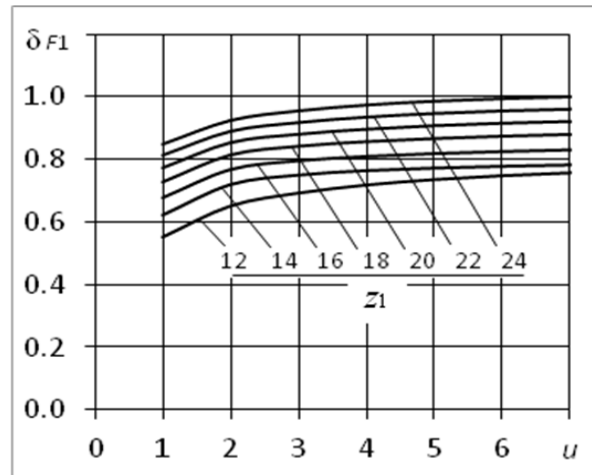


Рис. 4. Отношение целевых функций, полученных из формул В.Н. Кудрявцева и А.С. Яковлева

Отношение вариантов целевых функций (3), (20) для условий прочности на изгиб включает четыре коэффициента:

$$\delta_{F1,2} = \frac{K_\rho Y_{Fa1,2} Y_{V1,2}}{Y_{FS1,2}}. \quad (21)$$

Коэффициенты K_ρ и $Y_{FS1,2}$ определим по аппроксимирующим формулам, полученным по данным В.Н. Кудрявцева [8],

$$K_p = 1.475 \ln \left(\frac{1.475 z_1 u}{(u+1) \sin^2 \beta \cos \beta} \right) - 4.379. \quad (22)$$

$$Y_{FS1,2} = 1.75 + \frac{8}{(z_{1,2} + z_{1,2}^{0.5})}, \quad (23)$$

а коэффициенты $Y_{Fa1,2}$ и $Y_{V1,2}$ определим по формулам из монографии [12]

$$Y_{Fa1,2} = 1 - \frac{0.07 (1.19 - 3.42 z_{1,2}^{-1})(a^*)^2}{1 + 0.14 a^* + 0.07 (a^*)^2}, \quad (24)$$

$$Y_{V1,2} = 0.579 + \frac{0.524}{z_{1,2}} + \frac{3.569}{z_{1,2}^2}, \quad (25)$$

где численные величины соответствуют исходному контуру по ГОСТ 15028-76 и нулевому коэффициенту радиального смещения.

На диаграмме рис. 4 показана зависимость отношения δ_{F1} от числа зубьев шестерни и передаточного числа. Расхождение целевых функций инициирует эмпирический коэффициент K_p . Три других коэффициента образуют устойчивое соотношение для объёмной и плоской моделей расчета:

$$\delta_{Ya} = \frac{Y_{Fa1,2} Y_{V1,2}}{Y_{FS1,2}} = 0.28 \dots 0.30, \quad (26)$$

$$\delta_y = \frac{Y_{V1,2}}{Y_{FS1,2}} = 0.28 \dots 0.31. \quad (27)$$

Рассчитанные по разным методикам коэффициенты формы зубьев $Y_{V1,2}$ и $Y_{FS1,2}$, отличаются практически постоянным множителем (рис. 5), а коэффициенты $Y_{Fa1,2}$ протяженности площадки контакта лишь уточняют их отношение.

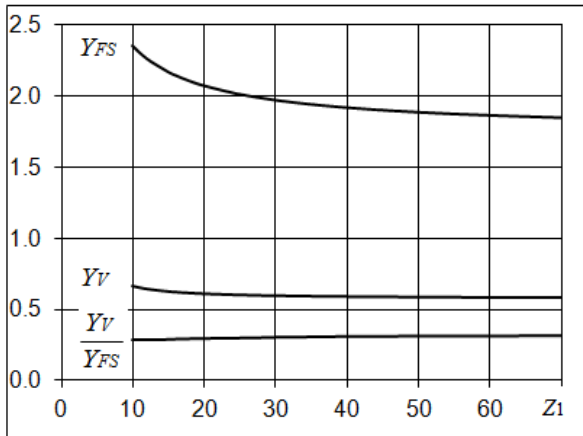


Рис. 5. Коэффициенты формы и их отношение

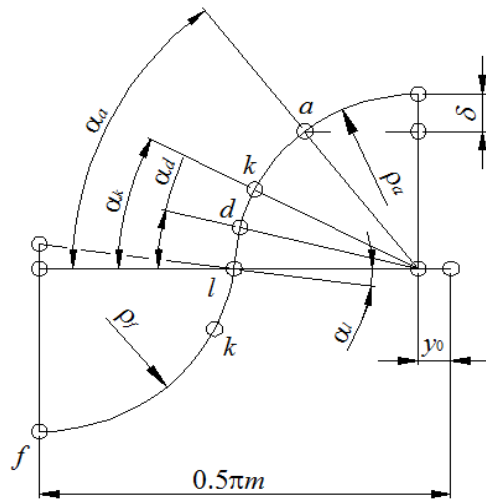


Рис. 6. Элементарный ИПК

Соотношение (26) позволяет представить целевую функцию (18) в более удобном для последующего анализа виде

$$t_{F1(2)} = \left(\frac{\sigma_{Flimb1(2)}^0}{S_{F1,2} K_F} \right) \left(\frac{2 K_\varepsilon \operatorname{tg} \beta \cos^3 \beta}{\pi_1 \varepsilon_\beta z_1 \delta_{Ya} Y_{FS1,2}} \right) \left(\frac{1}{\pi(u^2 + 1)} \right) = q_{F1,2} \frac{\gamma_{F1,2}}{v_F}. \quad (28)$$

Рассмотренные варианты целевых функций расходятся в интервале наиболее применяемых передаточных чисел, что вносит неопределенность в задачу оптимизации. Расчетные

формулы В.Н. Кудрявцева и полученные из них целевые функции содержат сводные коэффициенты \square и K_p геометрических и эмпирических величин, которые трудно анализировать без фактических экспериментальных данных. В решении Г. Герца и расчетной формуле А.С. Яковлева параметры представлены явно, поэтому функции (15) и (28) более удобны для дальнейшего анализа.

Из соотношений (1), (4) следует полезная формула для расчета функции допускаемых напряжений действующих и опытных образцов:

$$q = T_1 \left(\frac{v}{\gamma} \right) \frac{(u + 1)^2}{\pi a_w^2 b_w (u^2 + 1)}. \tag{29}$$

Мы уже отмечали [5] устойчивость этого показателя, который отражает специальные и отраслевые требования к надежности и исполнению передач. В передачах М.Л. Новикова при твердости рабочих поверхностей 290–320 НВ – $q_H = 9–12$ МПа, $q_F = 310–330$ МПа.

Для фиксированных значений функции допускаемых напряжений q и передаточного числа u предельная нагрузочная способность передач М.Л. Новикова будет достигнута при максимальных значениях функций зацепления.

$$\gamma_{H1,2} = \frac{\sigma_{H \lim 1,2} K_{IV}}{Z_E^2 S_{1,2}} \cdot \frac{z_1 K_\epsilon \cos \alpha_w}{3 \epsilon_\beta \sin^2 \alpha_w \sin^3 \beta}, \tag{30}$$

$$\gamma_{F1,2} = \left(\frac{2 K_\epsilon \operatorname{tg} \beta \cos^3 \beta}{\pi_1 \epsilon_\beta z_1 \delta_{Y\alpha} Y_{FS1,2}} \right). \tag{31}$$

Это неявные многопараметрические функции. Массив их геометрических параметров состоит из координат узловых точек профилей сопряженных зубьев. Профиль симметричного зубца, удовлетворяющий зацеплению М.Л. Новикова с двумя линиями зацепления, может быть определен произвольным сочетанием отрезков кривых и прямых линий, однако технологические условия формообразования накладывают свои ограничения. При обкате заготовки инструментом реечного типа профиль зуба в торцовом сечении формируется как огибающая кривая множества последовательных положений ИПК, и достижение технологичности связано с его рациональной формой.

Будем рассматривать *элементарный* ИПК, сторона которого в торцовой плоскости зацепления образована парой дуг окружностей, соединенных отрезком прямой линии (рис. 6). Расширение впадины ИПК и смещение y_0 центра дуги ножки относительно оси впадины обеспечивают достаточную толщину формируемого зуба под вторую позицию обката.

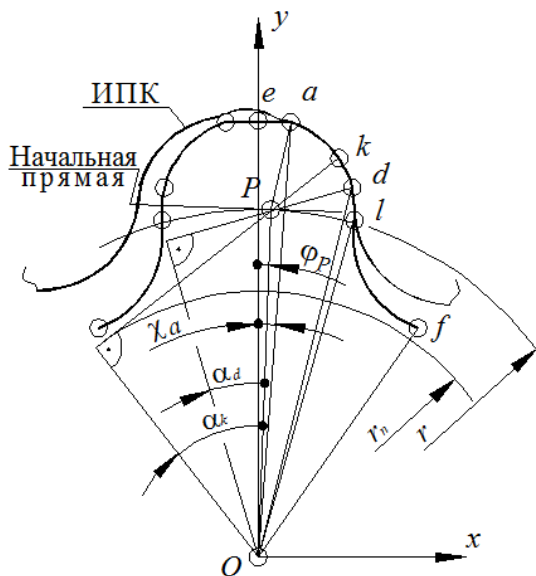


Рис. 7. Определение профиля зуба

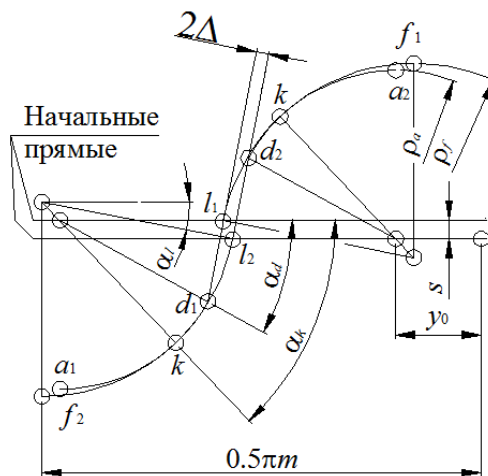


Рис. 8. Сопряжение пары элементарных ИПК

Профиль зуба, образованного элементарным ИПК, определен на торцевой плоскости четырьмя узловыми точками: a, d, l, f – и их восемь координатами (рис. 7). Расстояние r_n от оси зубчатого колеса до плоскости, проходящей через линии зацепления, будем рассматривать как аналог радиуса *основной* окружности эвольвентного зубчатого колеса. Окружность радиусом r_n в торцевой плоскости зацепления М.Л. Новикова будем называть *опорной*. Если радиус опорной окружности шестерни использовать как масштабный фактор и принять равным единице, то относительный радиус опорной окружности колеса будет равен передаточному числу u , а профиль зуба будет определен в полярной системе координат относительными безразмерными параметрами: $r_a, r_d, r_l, r_f, \chi_a, \chi_d, \chi_l, \chi_f$, каждый из которых есть функция чисел зубьев $z_{1,2}$ и параметров ИПК.

Относительные величины B , представленные в долях радиуса опорной окружности, и их модульные коэффициенты B^* связаны соотношением

$$B = \frac{2}{z_1 \cos \alpha_k} B^* . \tag{32}$$

Шестнадцать координат узловых точек профилей и пять независимых переменных ($z_{1,2}, \alpha_w, \beta, \varepsilon_\beta$) определяют геометрию зацепления, целевые функции зацепления (30) и (31) и коэффициенты формы зубьев $Y_{Fa1,2}$. Координаты узловых точек профиля, коэффициенты формы и независимые переменные связаны конструктивно-технологическими условиями существования и качества зацепления. Если условия сформулировать в виде системы совместных уравнений, число которых равно числу оптимизируемых переменных, то задача оптимизации может иметь единственное решение.

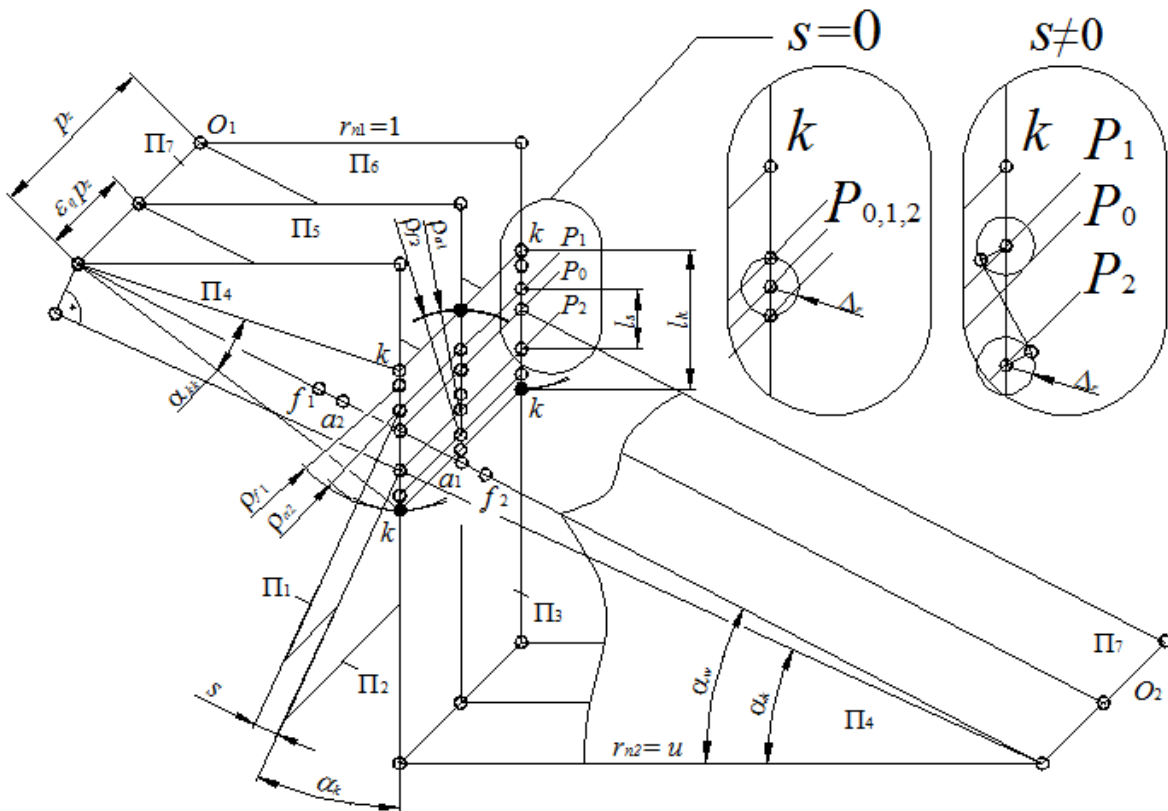


Рис. 9. Схема зацепления М.Л. Новикова:

$O_{1,2}$ – оси зубчатых колес; $\Pi_{1,2}$ – начальные плоскости производящих реек; Π_3 – плоскость линий зацепления; $\Pi_{4,5,6}$ – передняя, средняя и задняя торцовые плоскости; Π_7 – плоскость осей зубчатых колес; k – точки контакта на линиях зацепления; $P_{0,1,2}$ – полусные линии рабочего и станочных зацеплений; l_k – расстояние между линиями зацепления

1. Условие сопряжения профилей – основная теорема зацепления Виллиса.

Профили, передающие вращение между параллельными осями с заданным отношением угловых скоростей, в точках касания имеют общую нормаль, которая проходит через полюс зацепления [15]. Следовательно, для реализации постоянного передаточного числа в зацеплении М.Л. Новикова с двумя линиями зацепления общие нормали к точкам касания должны лежать в плоскости, проходящей через линии зацепления. В этом случае проекции общих нормалей станочных и рабочих зацеплений на торцовую плоскость будут лежать на одной прямой.

Из схемы сопряжения пары элементарных ИПК (рис. 8) и схемы зацепления (рис. 9) получим соотношение для угла зацепления

$$\alpha_w = \alpha_k + \arctg\left(\frac{s^* \operatorname{ctg}\alpha_k}{0.5(z_1 + z_2) + s^*}\right), \quad (33)$$

где s^* – коэффициент расстояния между начальными прямыми пары сопряженных ИПК и делительными цилиндрами зубчатых колес:

- в рабочем зацеплении

$$s^* = \rho_f^* \sin \alpha_l - (\rho_f^* - \rho_a^*) \sin \alpha_k; \quad (34)$$

- для межосевого расстояния

$$a_w^* = \frac{0.5(z_1 + z_2) + s^*}{\cos(\alpha_w - \alpha_k)}; \quad (35)$$

- для расстояния между линиями зацепления

$$l_k^* = 2\rho_a^* - \frac{s^*}{\sin \alpha_k}. \quad (36)$$

При $s^* = 0$ начальные цилиндры станочного и рабочего зацеплений совпадают, центры кривизны головок зубьев шестерни и колеса находятся на полюсной линии, а расстояние между линиями зацепления равно $2\rho_a$. При $s^* \neq 0$ начальные цилиндры станочного и рабочего зацеплений не совпадают. При $s^* > 0$ начальные цилиндры станочного зацепления находятся по разные стороны от полюсной линии, а при $s^* < 0$ пересекаются.

2. Условие плавности.

Погрешности изготовления и сборки передачи приводят к отклонению общих нормалей сопрягаемых поверхностей и полюса от номинального положения. При вращении колес положение нормалей, полюса и отношение угловых скоростей изменяются, что вызывает вибрацию и шум передачи.

В зацеплениях с $s^* = 0$ действительное положение полюсов определяется случайным смещением центров кривизны профилей от номинального положения, поэтому угол зацепления принимает случайное значение.

В зацеплениях с $s^* \neq 0$ расстояние l_s между центрами кривизны головок действует как направляющая база и снижает влияние технологических погрешностей на положение полюса и величину угла зацепления. Если отклонение центров кривизны ограничено радиальным допуском Δ_r , то погрешность угла зацепления составит

$$\Delta_\alpha \approx \frac{2\Delta_r^*}{l_s^*}. \quad (37)$$

Если отклонение угла зацепления задано, то для коэффициента s^* получим условие

$$s^* \geq \frac{2\Delta_r^*}{\Delta_\alpha} \sin \alpha_k. \quad (38)$$

Для элементарного ИПК при ограничениях $2\Delta_r = 0.05m$, $\Delta_\alpha = 2^\circ$ получено $s^* \geq 0.0716$.

Шум и вибрация в зацеплениях с $s^* \neq 0$ могут быть меньше, чем в зацеплениях с $s = 0$, так как влияние технологических отклонений снижено удалением центров кривизны сопрягаемых поверхностей от полюсной линии. Большинство известных зацеплений М.Л. Новикова выполнены с $s^* = 0$, что отрицательно сказывается на потребительских свойствах изделий. Благоприятными виброакустическими характеристиками отличаются зацепления, образованные посредством исходного контура ИПК ЮТЗ-65 [12], в которых $s^* \approx -0,13$.

3. Условие собираемости пары ИПК.

В элементарном ИПК (см. рис. 8) коэффициенты толщины зуба и ширины впадины по начальной прямой отличаются на величину

$$\delta_s^* = \pi - 4\rho_f^* \cos \alpha_1, \quad (39)$$

поэтому сопряжение пары элементарных ИПК можно представить только как одностороннее. После обката заготовок в первой позиции ширина впадин по начальной окружности станочного зацепления меньше толщины выступов на величину $\delta_s^* m$. Чтобы собрать зацепление после обката во второй позиции необходимо, чтобы сумма коэффициентов тангенциальных смещений шестерни и колеса удовлетворяла условию

$$\delta_s^* = y_1^* + y_2^*. \quad (40)$$

(Продолжение следует.)

Библиографический список

1. **Колодкин, М.С.** Сравнительные экспериментальные исследования нагрузочной способности зацеплений эвольвентного и М.Л. Новикова // Труды Ленинградской краснознаменной военно-воздушной инженерной академии им. А.Ф. Можайского. 1960. Вып. 313. С. 9–23.
2. **Короткин, В.И.** Сравнение зубчатых передач Новикова и эвольвентных передач // Вестник машиностроения. 2009. №1. С. 3–8.
3. **Парубец, В.И.** Дискуссия о зацеплении Новикова и ее итоги. Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники // Труды междунар. науч. - техн. конф. 27-28 апреля 2010 г. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. С. 15–20.
4. **Андриенко, Л. А.** Критерий удельной нагрузочной способности механических передач / Л. А. Андриенко, А.Н. Петровский // Изв. вузов. Машиностроение. 2008. № 7. С. 22–32.
5. **Попов, П.К.** Обобщенная оценка совершенства механических передач / Попов П.К., Л.А. Андриенко, А.Н. Петровский // Инженерный журнал. 2009. № 7. С 20–31; №8. С 6–12.
6. **Петровский, А.Н.** Конструктивно-технологическая оптимизация геометрических параметров эвольвентного зацепления // Вестник машиностроения. 2012. № 3. С 41–49.
7. Пат. 2412026 РФ, МКП В23F5/14, В23F5/14. Способ образования зубчатых передач двухпозиционным обкатом / А.Н. Петровский // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 2011. №5.
8. **Кудрявцев, В.Н.** Детали машин: учебник для студ. машиностроит. спец. вузов / В.Н. Кудрявцев. – Л.: Машиностроение, 1980. – 464 с.
9. **Кудрявцев, В.Н.** Конструкции и расчет зубчатых редукторов: справочное пособие / В.Н.Кудрявцев, Ю.А. Державец, Е.Г. Глухарев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 328 с.
10. **Тимошенко, С.П.** Теория упругости: [пер. с англ.] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
11. Прочность, устойчивость, колебания: справочник. В 3 т.; под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. Т. 2. – 463 с.
12. **Короткин, В.И.** Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие / В.И. Короткин, Н.П. Онишков, Ю.Д. Харитонов. – М.: Машиностроение -1, 2007. – 384 с.
13. **Яковлев, А.С.** Определение напряжений изгиба в зубьях цилиндрических передач Новикова // Вестник машиностроения. 1984. № 6. С. 18 – 20.

14. Передачи зубчатые Новикова с твердостью рабочих поверхностей зубьев ≥ 35 HRC и более. Расчет на прочность: метод. рекоменд. МР – 221 – 86. – М.: ВНИИТМАШ, 1987. – 86 с.
15. Литвин, Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

Дата поступления
в редакцию 04.12.2013

A.N. Petrovsky

NOVIKOV GEARING PARAMETERS OPTIMIZATION PROBLEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article deals with the improvement in quality, technological effectiveness and competitive strength of Novikov gearing through gear parameters optimization.

Design/methodology/approach: The optimization criterion used in the work is the specific load carrying capacity of gear. This parameter is defined as the ratio of gear torque rating to the sum of volumes of pitch cylinders of gear and wheel, is expressed in units of stress and is used to plot target functions. The parameter is numerically equal to the mean elastic strain energy per unit of pitch cylinder volume.

The optimization problem is cast as the system of equations of existence and quality of working and work-tool gears using the two-position gear generation process.

Findings: The numerical solution is obtained for the two-dimensional array of potential numbers of teeth in gear z_1 and wheel z_2 . Optimized parameters provide for the limit load carrying capacity regulated by the known strength calculation methods.

Research limitations/implications: The article shows that design load carrying capacity of the optimized Novikov gearing t_{Nov} is higher than that of the optimized involute gearing t_{inv} , ref. Fig. 1. Teeth in the optimized Novikov gearing are subject to significantly lower bending stress than the optimized involute gearing teeth. Tooth profiles and geometry factors are presented in the diagram, ref. Fig. 2. X- and Y-dimensions of profiles are expressed in fractions of the main gear circumference, Y_{FS1Nov} is the Novikov gearing tooth geometry factor; Y_{FS1inv} is the involute gearing tooth geometry factor.

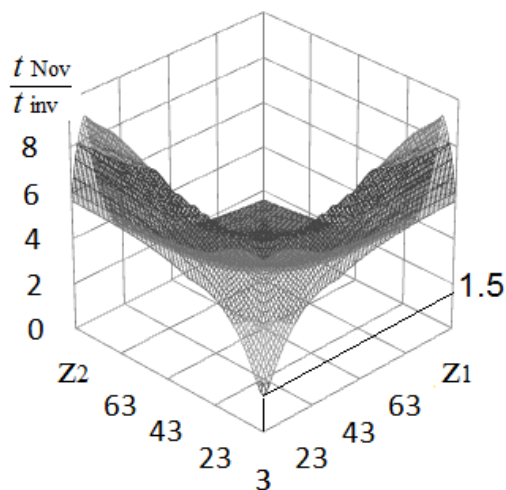


Fig. 1. Specific load carrying capacity ratio

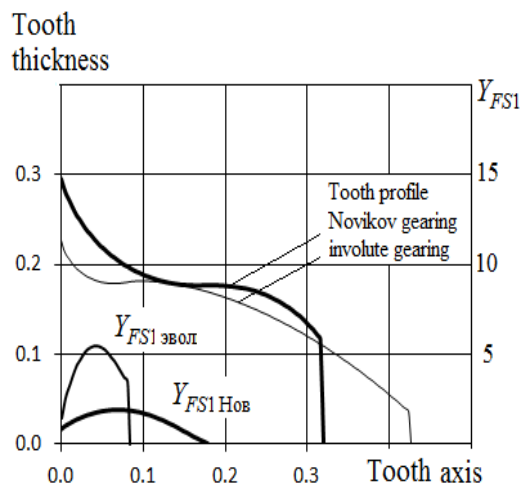


Fig. 2. Tooth profiles and geometry factor curves
for $z_1=10$, $z_2=36$

Originality/value: Solving the optimization problem makes it easier to design competitive transmissions using the Novikov gearing and creates opportunities for their typification and standardization.

Key words: Novikov gearing, geared transmission, gearbox, two-position gear generation process, optimization, load carrying capacity, geometry factor, reliability, quality, noise, vibration.

УДК 621.9

В.М. Тихонов, Е.А. Уткин

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН РЕЗАНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложены результаты исследований процесса формирования поверхностных слоёв деталей машин, получаемых лезвийной обработкой. Исследуются микрорельефы шероховатости поверхности в продольном направлении, это даёт возможность оценить структуру получаемой поверхности и попытаться понять процессы, происходящие при резании. Поставлены эксперименты на скоростях от 1,5 - 12 м/с и 0,00068 м/с. Подтверждено возникновение трещин на скорости 1,5 м/с.

Ключевые слова: резание металлов, продольная шероховатость, трещина, переходная зона, индентирование, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

В современном машиностроении одним из лимитирующих факторов является качество выпускаемой продукции. Время работы деталей машин напрямую зависит от показателей качества, поэтому заинтересованность в их высоких показателях способствует исследованиям в этом направлении. Одним из показателей, к которым предъявляются высокие требования, является шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей машин при использовании лезвийной обработки.

Одной из первых работ по изучению микрогеометрии поверхности детали, обработанной лезвийным инструментом, была работа Исаева А.И. В ней рассмотрен вопрос взаимосвязи микрогеометрии поверхности в продольном и поперечном направлениях. Было установлено, что при обработке некоторых марок конструкционных сталей в некотором диапазоне скоростей резания наблюдается образование весьма плохой геометрии при измерении ее в направлении среза.

В работе [1] на основании экспериментальных исследований системы резания получены достаточно общие закономерности влияния скорости резания. Проведённые исследования показывают ограниченное уменьшение величины шероховатости обработанной поверхности при широком диапазоне изменения режима резания. В работе [2] был получен график зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 1).

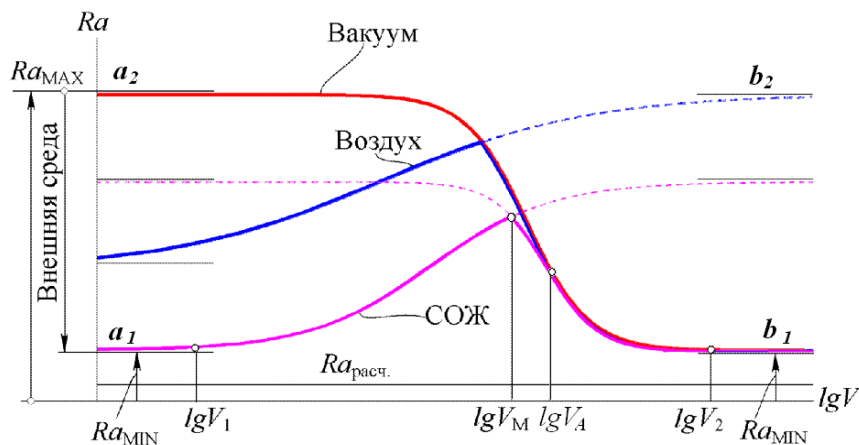


Рис. 1. Зависимость поперечной шероховатости от скорости

Левая часть зависимости показывает влияние окружающей среды на процесс резания и шероховатость получаемой поверхности. Обработка поверхности в условиях вакуума ха-

рактически характеризуется некоторым критическим давлением. При давлении, меньшем критического, имеет место взаимодействие ювенильных металлических поверхностей, что характеризуется уменьшением нагрузок, необходимых для схватывания металлов. В результате чего происходит образование вторичных пластически деформированных зон на фрикционных контактах (зон пластического контакта, застойных зон, нароста и т.д.) с образованием новых поверхностей раздела, подменяющих переднюю и задние поверхности. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей всегда способствует уменьшению схватывания (адгезионного взаимодействия) и уменьшению пластичности обрабатываемого материала, что ведёт к улучшению шероховатости поверхности.

При увеличении скорости шероховатость Ra увеличивается и достигает максимума на скорости V_M . Далее изменение шероховатости происходит согласно правой ветви зависимости. При увеличении скорости резания создаются условия, постепенно переводящие систему резания в автономный режим взаимодействия контактных поверхностей. И, начиная со скорости V_A , процесс полностью переходит в автономный режим, т.е. не реагирует на изменение внешней среды. Причём уровень асимптоты b_1 является константой, практически не зависящей от скорости резания, обрабатываемого и инструментального материала.

В работе [2] была описана математическая модель процесса формирования шероховатости в процессе резания (рис. 1). Для её описания были использованы экспоненциальные и логистические зависимости, представляющие собой широко используемые модели. В результате получено следующее представление модели:

$$Ra(V) = \begin{cases} a_1 + \frac{a_2}{1 + \exp(-a_3 \log(V) - a_4)} \\ \text{при } V \leq V_M \\ b_1 + \frac{b_2}{1 + \exp(-b_3 \log(V) - b_4)} \\ \text{при } V \geq V_M \end{cases},$$

где a_1 и b_1 – Ra_{\min} левой и правой ветвей; a_2 и b_2 – расстояние между Ra_{\min} и Ra_{\max} в левой и правой ветвях; $a_3 = 4,394/\Delta V$ ($\Delta V = \log V_{90\%} - \log V_{10\%}$); $V_{90\%}, V_{10\%}$ – скорости, при которой достигаются 90 и 10% от $a_1 + a_2$ соответственно (определяется из анализа графика экспериментальных данных); $a_4 = \log V$, при которой достигается $Ra = 1/2(a_1 + a_2)$; b_3 – определяется аналогично a_3 , но является отрицательным; $b_4 = \log V$, при которой достигается $Ra = 1/2(b_1 + b_2)$.

Каждая из двух частей математической модели описывает процесс формирования шероховатости до скорости, при которой наблюдается максимальное её значение и после, то есть левой и правой логистики графика зависимости $Ra - V$.

Шероховатость, фиксируемая на деталях, в большинстве случаев контролируется в поперечном направлении. Данный способ нормирования шероховатости наиболее прост и удобен. Но такой способ регистрации шероховатости не может позволить нам судить о структуре получаемой поверхности, так как шероховатость фиксируется в направлении образующей не позволяет увидеть поверхность, выходящую из под задней поверхности режущего инструмента. Поэтому для изучения процессов, происходящих в зоне резания, и структуры рельефа поверхности, полученной при прохождении инструмента, потребовался переход на продольное направление результирующего движения резания V_e (продольная шероховатость). Именно продольная шероховатость находит своё отражение в поперечной шероховатости с циклом πD , внося свою составляющую в шероховатость, образованную кинематическими факторами: радиусом при вершине резца и подачей. Для исследования продольной

шероховатости было разработано специальное оснащение и инструмент, позволяющий регистрировать указанный параметр. Опыты проводились на стали 45.

В результате экспериментов были получены профилограммы продольных шероховатостей. Интересную структуру имеет микрорельеф поверхности, полученный на скорости 1,5 м/с. На рис. 2 продемонстрирован участок с данного профиля.

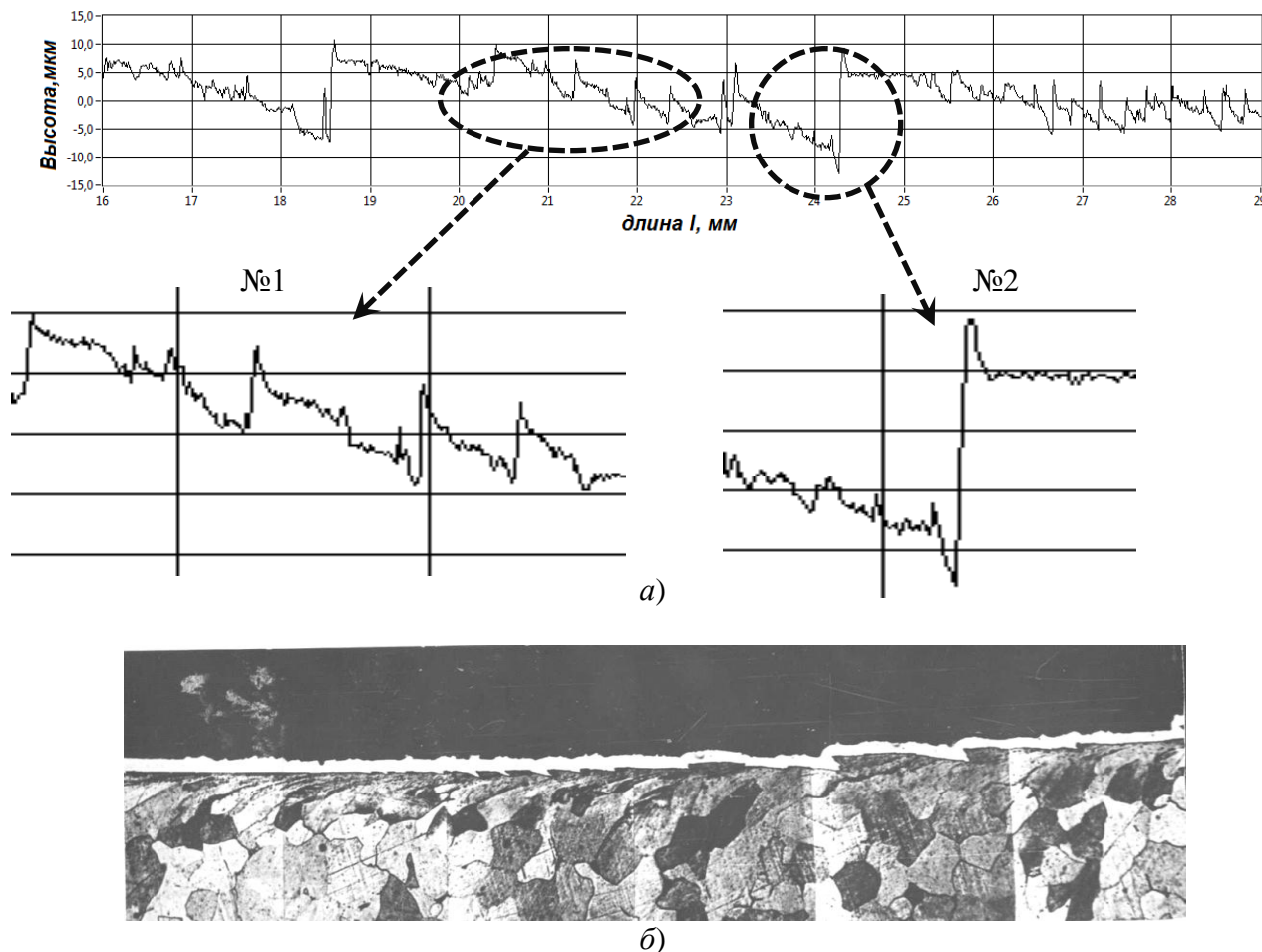


Рис. 2. Профилограммы продольных шероховатостей:

а – фрагмент микрорельефа на скорости 1,5 м/с;
б – шлиф продольной шероховатости

Как видно из профилограммы (рис. 2, *а*), на обработанной поверхности встречаются два типа повторяющихся скачкообразных участков под номерами 1 и 2. Участок №2 характеризуется резкой сменой уровня обработанной поверхности. Предположительно, данный участок профиля может возникнуть во время разрушения переходной зоны. При разрушении переходной зоны вылет режущего инструмента мгновенно уменьшается на величину этой зоны, что приводит к изменению уровня обрабатываемой поверхности.

Участок под №1 сосредоточен на убывающем уровне и не ведёт к значительному изменению высоты поверхности. Уровень изменяется по мере развития переходной зоны. Структура имеет пилообразный вид. При внимательном рассмотрении шлифа продольной шероховатости (рис. 2, *б*) можно выделить трещины, направленные под углом к поверхности. Микротрещины, получаемые в продольном направлении, в дальнейшем будут играть роль концентраторов, что может привести к последующему их разрушению.

По мере увеличения скорости резания выявленная структура поверхности исчезает и шероховатость улучшается. При скоростях выше 3 м/с поверхность состоит лишь из волнистости и высокочастотного шума. По полученным данным построены амплитудно-частотные

характеристики (АЧХ) получаемых профилей (рис. 3), из которых снижение амплитуды колебания уровня шероховатости.

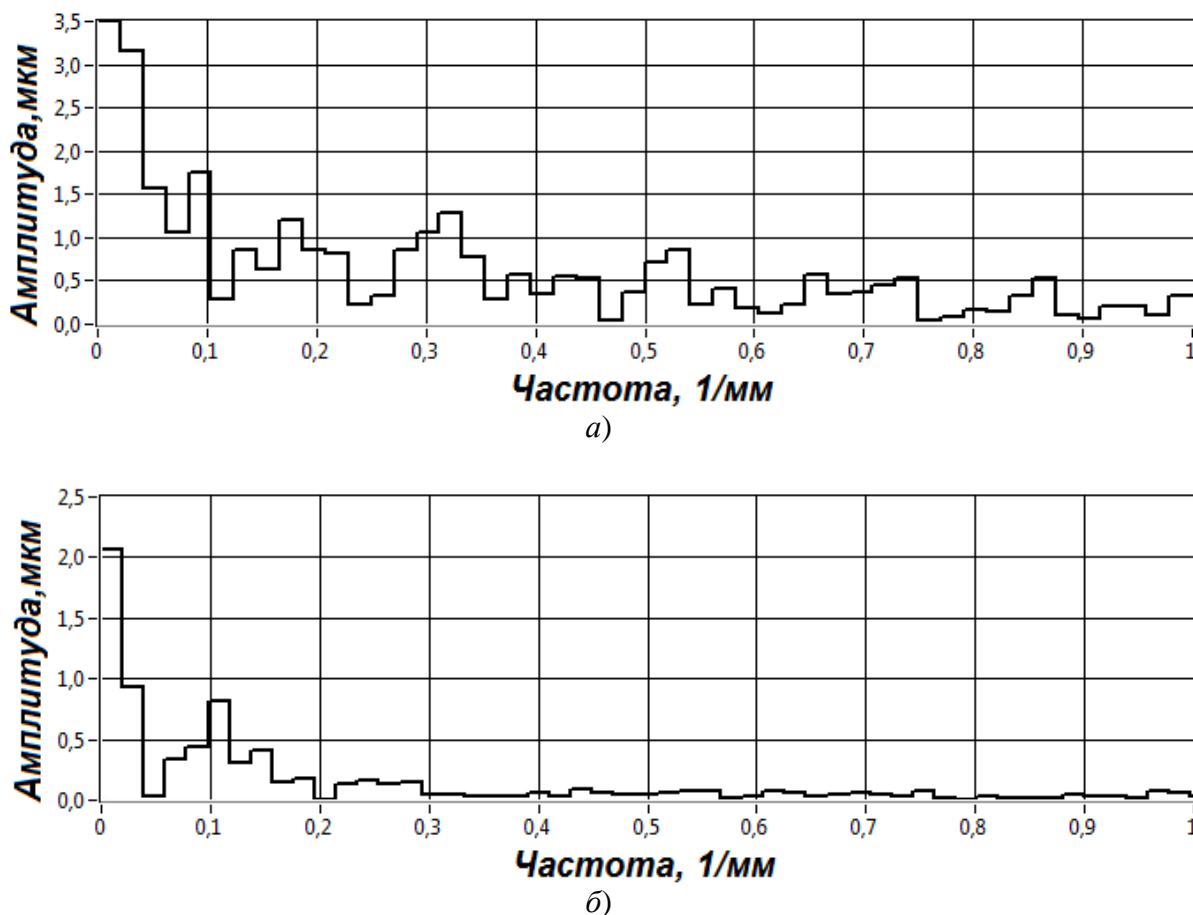


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика полученных профилей на скорости:
а – 1,5 м/с; б – 3 м/с

На приведённых АЧХ отчётливо выделяется волнистость микропрофиля в виде гармоники с высокой амплитудой и малой частотой. При скорости 1,5 м/с выделяются гармоники, образованные участками с трещинами, о которых шла речь выше. Они составляют основную часть шероховатости в продольном направлении, что напрямую влияет на величину поперечной шероховатости поверхности.

На более высоких скоростях АЧХ характеризуется только волнистостью и шероховатостью поверхности, что и получается при регистрации микрорельефа поверхности на высоких скоростях на рис. 4 отчётливо видно отсутствие трещин на скоростях больше 1,5 м/с.

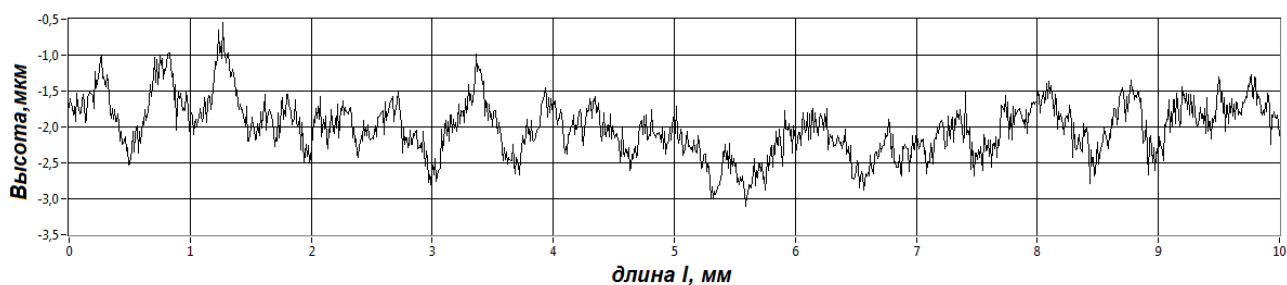


Рис. 4. Фрагмент микрорельефа на скорости 3 м/с

На скоростях больше 1,5 м/с, несмотря на малую шероховатость поверхности, значи-

тельный вклад в параметр R_a в поперечном направлении вносит волнистость продольного профиля. Возможно это и является коренной причиной недостижимости при лезвийной обработке уровня шероховатости меньше уровня b_1 на графике зависимости $R_a(V)$.

Проведены эксперименты по исследованию шероховатости на очень малой скорости (рис. 5).

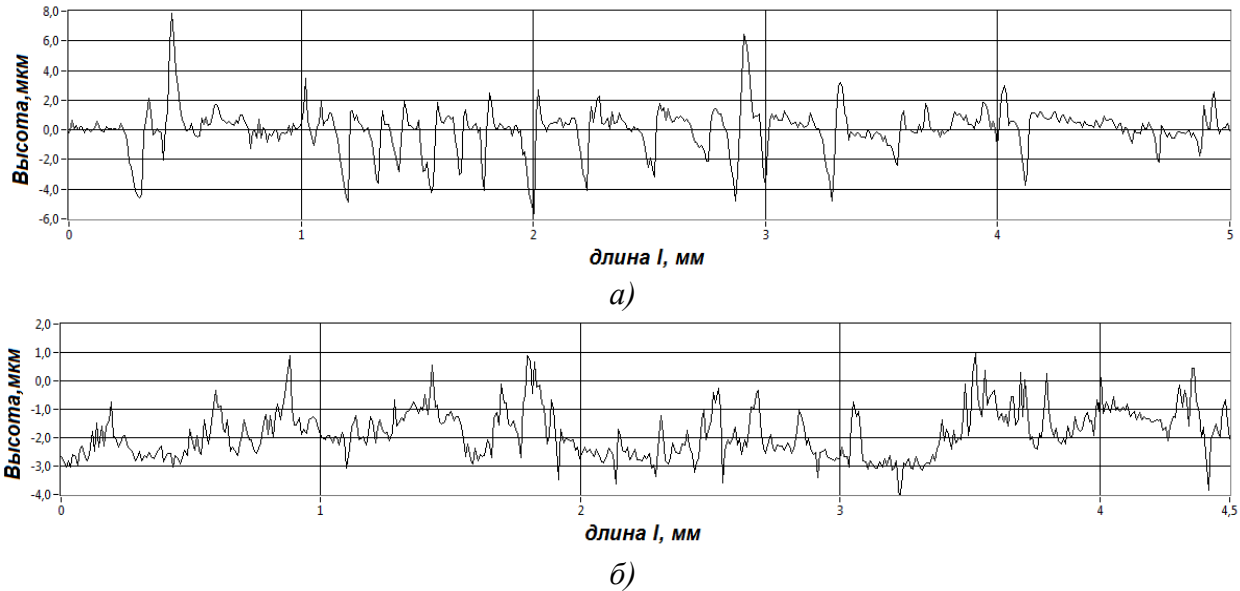


Рис. 5. Микропрофили на скорости 0,00068 м/с:
а - участок с трещинами; *б* - участок без трещин

Данный профиль является неоднородным по своей структуре. Соответственно процессы, происходящие во время формообразования, не стабильны и постоянно меняются. Предположительно, процессы формообразования на высоких и малых скоростях схожи. Разница между значениями параметра R_a при обработке на воздухе и с СОЖ при скоростях, соответствующих левой ветви зависимости $R_a - V(a_1)$, также связана с появлением на микропрофиле поверхности участков с выраженными трещинами. Есть отличительная особенность этих трещин от полученных при скорости 1,5 м/с. При таком же размахе по высоте они имеют длину в среднем в четыре раза короче.

По результатам экспериментов был построен график зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 6), подтверждающий результаты работы [1].

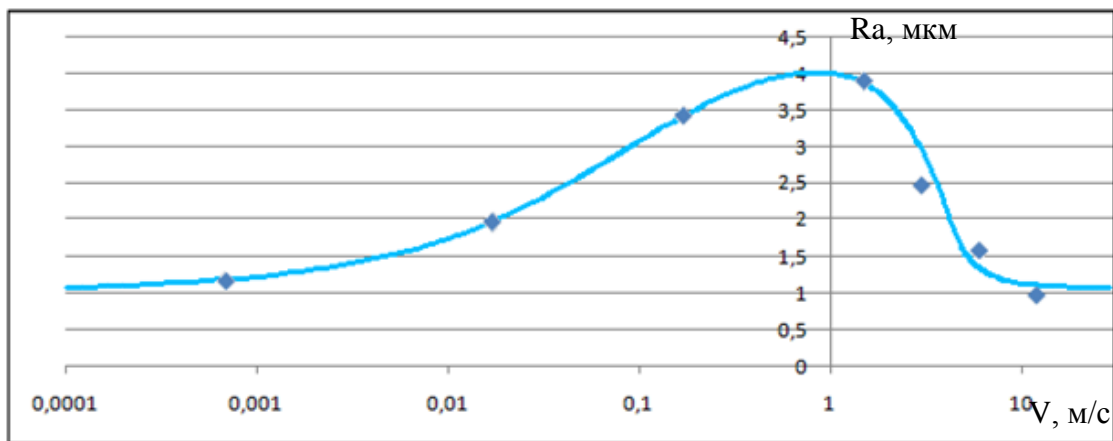


Рис. 6. График зависимости продольной шероховатости от скорости резания

Полученный график зависимости продольной шероховатости от скорости резания подобен графику зависимости поперечной шероховатости от скорости. Следовательно шероховатость поверхности детали определяется продольной шероховатостью при чистовых обработках, где случайная составляющая шероховатости вносит больший вклад, чем детерминированная, обусловленная кинематикой процесса резания.

Уровни шероховатости на правой и левой ветви зависимости имеют одинаковое значение. Они являются минимально достижимыми уровнями шероховатости при лезвийной обработке.

При исследовании проблемы плохой геометрии было обращено внимание на источники по механике разрушения контактирующих тел. Нас интересует индентирование (от англ. indentation fracture) – вдавливание индентора в менее твёрдое тело. Форма трещин, образующаяся при снятии нагрузки с индентора, изображена на рис. 7.

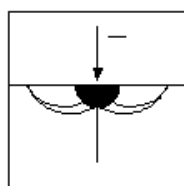


Рис. 7. Форма трещин при индентировании после снятия нагрузки

При рассмотрении шлифа продольного микропрофиля заготовки (рис. 2) чётко просматриваются микротрещины в виде пилообразной волны. Сравнивая эти микротрещины с радиальными трещинами рис. 7, образующимися при индентировании (во время снятия нагрузки), можно заметить их схожесть. Процессы, предшествующие возникновению трещин, в обоих случаях одинаковы. В обоих случаях в материале зарождается пластическая деформация. При уменьшении нагрузки напряжения меняют знаки и зарождаются радиальные трещины. После полного снятия нагрузки около деформированной зоны возникают растягивающие напряжения, которые приводят к расширенной системе боковых трещин. Можно предположить, что в обоих случаях причины, механизмы зарождения и развития трещин схожи. Несмотря на разницу твёрдости материалов, процесс происходит в условиях большого гидростатического давления, поэтому можно рассматривать процесс резания с точки зрения индентирования.

В процессе продвижения режущего клина материал выходит из-под задней поверхности и попадает в условия низкого давления, в результате чего упругодеформированный материал уже не способен существовать, сохраняя свои формы и объёмы. И напряжения, возникшие в металле, разрывают его, в результате чего появляется трещина.

В процессе продвижения режущего клина материал выходит из-под задней поверхности и попадает в условия низкого давления, в результате чего упругодеформированный материал уже не способен существовать, сохраняя свои формы и объёмы. И напряжения, возникшие в металле, разрывают его, в результате чего появляется трещина.

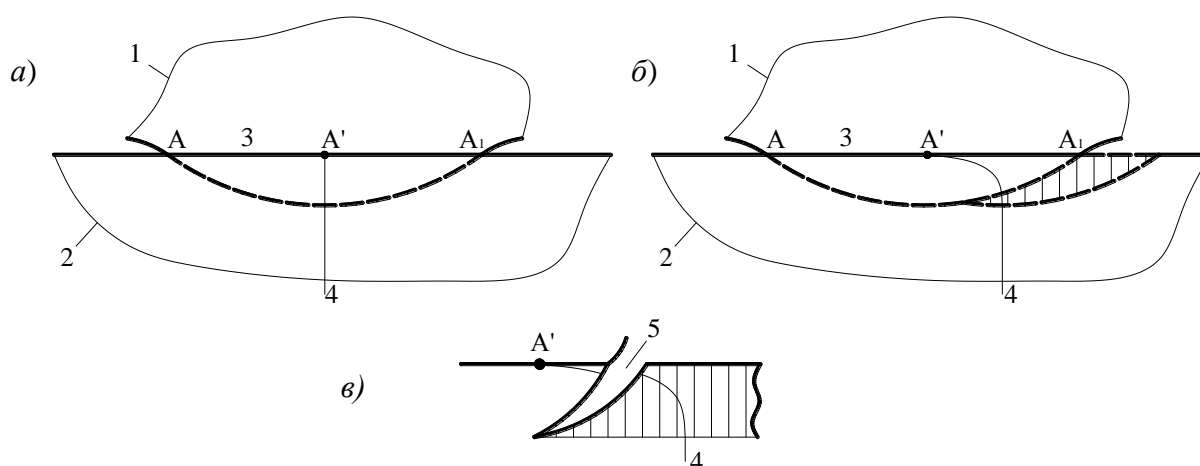


Рис. 8. Схема образования трещины

Описанная в работе [4] теория переходных зон также проливает свет на процессы, происходящие при резании. Накопление деформации в сдвиговом пятне идеального контакта однородных материалов обладает симметрией распределения между разделяемыми половинками при выполнении условия, что каждая точка контакта на главной линии сдвига перемещается в два

раза медленнее перемещения тела. Переход от сдвига между однородными телами к аналогичному сдвигу разных тел ведёт к изменению кинематики деформируемой области. Вместо симметричной линзы после скольжения возникает плоско-выпуклая линза (нарост).

Схема на рис. 8, *а* соответствует исходному моменту установления связи на площадке AA_1 между жёстким телом 1 и пластичным 2. Контакт 3 представляет главную линию скольжения. После перемещения жёсткого образца (рис. 8, *б*) на расстояние Δx точка A' границы пластического контакта перемещается на ту же величину (в два раза больше, чем при контакте одинаковых тел). Волокно, первоначально нормальное к поверхности, деформируется, изгибается по кривой 4. На шлифе 8, *г* можно наблюдать деформацию волокон в сторону движения режущего клина. Видно, как волокна растягиваются вдоль линии контакта тел. В определённый момент растягивающие усилия достигают предела прочности растягиваемых волокон, и на поверхности пластичного материала происходит образование трещины 5 (рис. 8, *в*). Дальше процесс повторяется, в результате чего поверхность покрывается микротрещинами. Наглядно видно на шлифе продольной шероховатости рис. 2, *б* последствия этого процесса. Это, безусловно, необходимо учитывать при назначении шероховатости на ответственные детали в таких отраслях как авиастроение, космонавтика и других отраслях, требующих высоких показателей надёжности и качества.

Вывод

Следует вводить дополнительные методы регламентации шероховатости. Необходимо регистрировать продольную шероховатость на поверхностях ответственных деталей, так как она находит отражение в поперечной шероховатости. Поперечная шероховатость не может дать информации о структуре поверхности, в частности, о наличии трещин, оставшихся после лезвийной обработки.

Библиографический список

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
2. Улитина А.В. Моделирование процесса формирования шероховатости при обработке металлов резанием: дисс. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ, 2004. – 94 с.
3. Макушок, Е.М. Массоперенос в процессах трения / Е.М. Макушок, Т.В. Калиновская, А.В. Белый. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 272 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

V.M. Tikhonov, E.A. Utkin

PROCESSES OF FORMING SURFACE LAYERS OF MACHINE PARTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Investigation of the influence of cutting processes on the quality of the products. Rationing longitudinal roughness details on the results of research.

Methodology: To register, surface topography, roughness profiler used. Recorded digital signal processed through software Labview 7. Held amplitude frequency analysis.

Findings: Proposed registration and valuation longitudinal roughness for critical parts for the purpose of registering the resulting surface structure.

Key words: cutting of metals, the longitudinal roughness, crack, transition zone, indentation, the amplitude-frequency characteristic (AFC).

УДК 621.9

И.Л. Лаптев, В.М. Тихонов

ТЕХНОЛОГИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОСМЕШИВАЕМЫХ СОЖ В МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы приготовления эмульсионных СОЖ как сложных коллоидных систем. Приведен анализ технологического оборудования для приготовления. Сформулированы основные требования к технологии и оборудованию для приготовления СОЖ, предложен вариант автоматизированной технологической системы приготовления и подачи СОЖ.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости, металлообработка, технология, система приготовления.

Водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) в современном машиностроительном производстве являются основным средством охлаждения и смазки зоны резания.

Водосмешиваемые СОЖ структурно представляют собой сложные коллоидные (дисперсные) системы, основной коллоидно-химической характеристикой которых является дисперсность. Эти системы гетерогенны, состоят из двух и более фаз: дисперсной фазы и дисперсионной среды, имеющих жидкое агрегатное состояние. Упрощенная структура водосмешиваемых СОЖ (эмульсий «масло в воде») в общем случае представляет собой дисперсию компонентов масляной фазы, состоящей из молекул органических масел и окруженных молекулами поверхностно-активных веществ (ПАВ), в воде. Синтетические СОЖ по своей структуре ближе к химическим растворам (рис. 1), полусинтетические жидкости имеют промежуточную (или смешанную) структуру.

Водосмешиваемые СОЖ соответствуют основным закономерностям поведения коллоидных систем, и, следовательно, накопленный опыт приготовления подобных систем, наряду с опытом действующих в металлообработке систем приготовления СОЖ, должен быть использован при разработке и внедрении технологии и средств оснащения систем приготовления с учетом особенностей функционирования коллоидной системы при воздействии высоких температур и давлений в процессе резания металлов.

Приготовление эмульсий в коллоидной химии можно представить как результат двух конкурирующих процессов - диспергирования и коалесценции. Теоретически процесс диспергирования не изучался так глубоко, как кинетика коалесценции. Внутрифазовое диспергирование – «быстрый» процесс по сравнению с коалесценцией, протекающей минуты, часы и даже месяцы. Получение метастабильных эмульсий с формированием большого числа капель дисперсной фазы в дисперсионной среде (процесс диспергирования) может осуществляться двумя методами: выращивание капель требуемых размеров из центра каплеобразования и дробление больших капель под действием внешней нагрузки.

На практике приготовление водосмешиваемых СОЖ осуществляется методом дробления в два этапа: дозирование компонентов и их предварительное смешивание с получением грубодисперсной эмульсии, а затем ее диспергирование до получения капель масляной фазы требуемых размеров. Чем меньше размер капель масляной фазы, тем выше качество эмульсии (седиментационная устойчивость, проникающая способность). Минимальный размер получаемых капель, чаще всего, определяется техническими возможностями диспергатора).

Для предварительного перемешивания компонентов эмульсионных СОЖ используют механическое перемешивание и перемешивание сжатым воздухом (барботирование). Однако при этом образуется грубодисперсная седиментационно - неустойчивая эмульсия. В процессе приготовления некоторые тяжелые нефтепродукты, входящие в состав эмульсии, практиче-

ски не эмульгируют, образуя вспененную воздухонепроницаемую "шапку", которая создает (при отсутствии периодического барботирования) благоприятные условия для развития анаэробных бактерий, что резко сокращает срок службы СОЖ, особенно в летнее время.

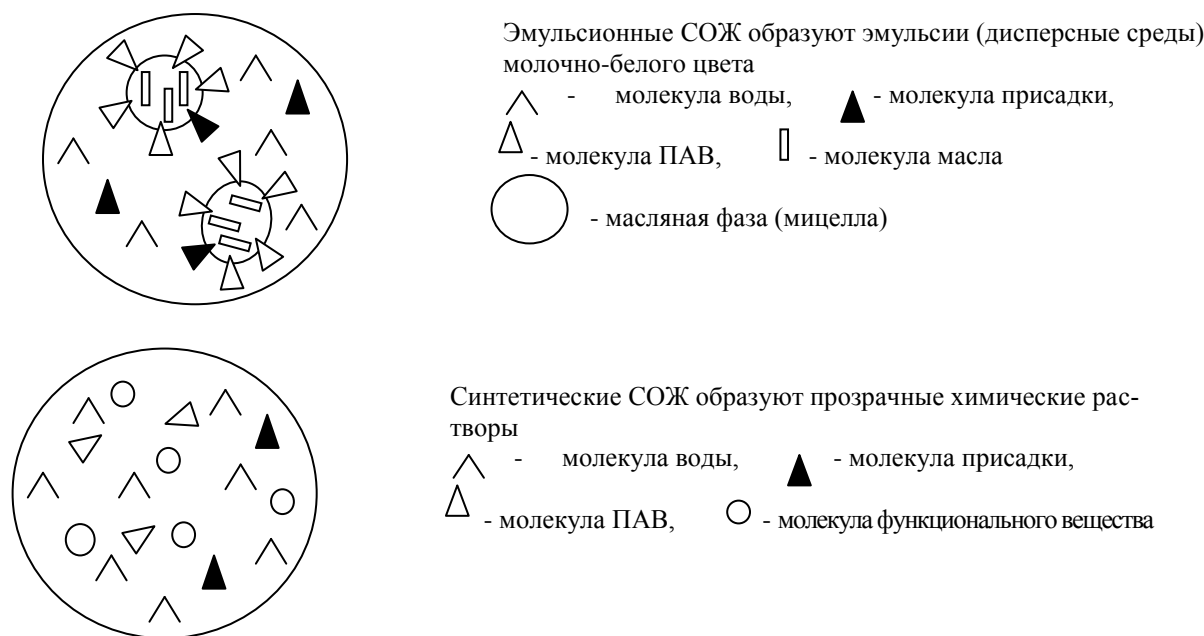


Рис. 1. Структура водосмешиваемых СОЖ

Более качественное диспергирование обеспечивается средствами технологического оснащения (СТО) с наложением низко- и высокочастотных колебаний. К ним относятся ультразвуковые свистки, пьезоэлектрические и гидродинамические генераторы различных конструкций. Однако в производственных условиях применение известных конструкций гидродинамических смесителей вызывает ряд трудностей, обусловленных образованием застойных зон в смесительных емкостях и наличием механических примесей в поставляемых эмульсиях. Из-за этого происходят частые отказы генераторов различных типов, особенно с подвижными элементами и узкими проходными сечениями.

Для приготовления СОЖ может использоваться ряд диспергаторов непрерывного действия: гидродинамические смесители, работающие на основе создания акустических колебаний пульсирующего между ротором и статором потока жидкости; проточно-кавитационные смесители; гомогенизаторы, использующие высокое давление (до 35 МПа) для продавливания диспергируемой среды через малые отверстия; роторные аппараты с модуляцией потока.

При реализации этих методов имеются большие трудности в дозировании компонентов эмульсий, в автоматизации работы системы приготовления, в обеспечении этой системы целым рядом специальных насосов.

Общие недостатки устройств для приготовления, выявленные в результате обобщения теоретических и производственных данных:

- возможность дестабилизации эмульсии при выполнении диспергирования в баке приготовления, при хранении готовой СОЖ в баке раздающем, при наличии застойных зон в проточных диспергаторах;
- дополнительные затраты энергии и операционного времени при многократном цикле прохождения эмульсии через диспергирующее устройство;
- необходимость предварительного дозирования и смешивания составных компонентов эмульсии перед подачей в диспергатор;

- использование дополнительных устройств (насосов) для подачи в диспергатор компонентов или предварительно смешанной эмульсии и для подачи эмульсии к металлорежущему оборудованию.

Эти недостатки затрудняют использование в производстве имеющиеся конструкторские решения и вызывают необходимость использования оригинальных решений.

В результате анализа теоретических исследований в области приготовления дисперсных систем сформирован комплекс физико-химических факторов, влияющих на образование эмульсии.

1. Качество и количество эмульгатора, способ введения эмульгатора в эмульсию. Данный фактор закладывается в процессе разработки и производства концентрата. В промышленных условиях, когда для приготовления СОЖ используется готовый концентрат, этот фактор может не рассматриваться.

2. Способ введения дисперсной фазы. Исследования показывают лучшие результаты эмульгирования (размер частиц, разброс дисперсности) при введении масляной фазы в водную среду.

3. Время эмульгирования. Установлено, что продолжение перемешивания сверх оптимального времени мало улучшает качество эмульсий. Например, при ультразвуковом эмульгировании средние размеры капель уменьшаются очень быстро в течение нескольких секунд и постепенно достигают предельного значения (рис.2). Таким образом, если время перемешивания больше оптимального, то затраты мощности оказываются невыгодными. Аналогичные результаты (например, приготовление прерывистым встряхиванием в пробирке - рис. 3) показывают все методы приготовления.

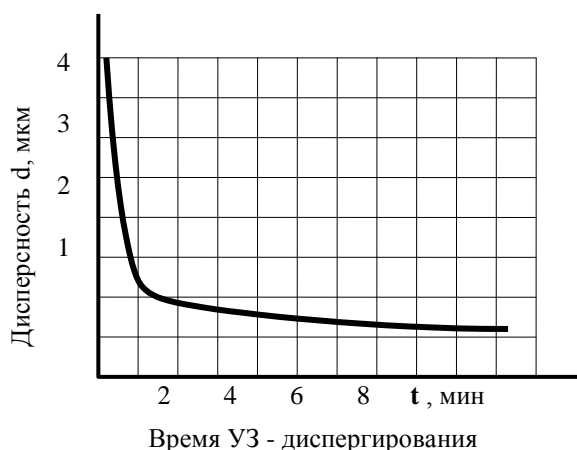


Рис. 2. Влияние времени диспергирования на размер капель масляной фазы

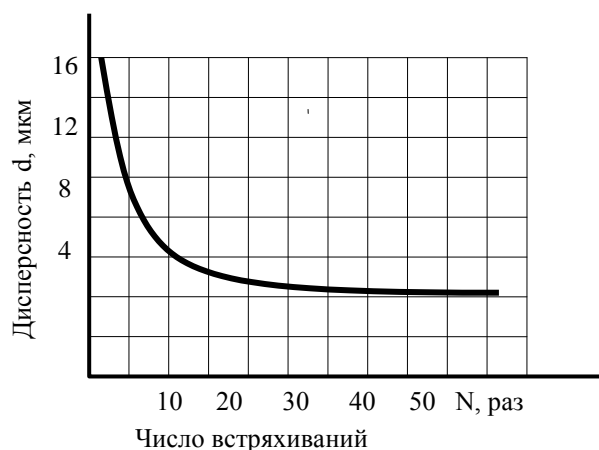


Рис. 3. Влияние числа встряхиваний на размер капель масляной фазы

4. Интенсивность перемешивания. Влияние данного параметра достаточно подробно изучено для пропеллерных мешалок. При неизменных физико-химических характеристиках смешиваемых жидкостей и той же самой аппаратуре лучшие результаты получены для более быстрого перемешивания. Одним из наиболее перспективных направлений является применение интенсификации турбулентного перемешивания с наложением на обычные процессы смешивания кавитационно-кумулятивного воздействия. Эффект воздействия от схлопывания кавитационных пузырьков и образования микровихрей позволяет получать высокую (вплоть до молекулярного уровня) однородность обрабатываемых сред.

Для реализации современной технологии приготовления сформирован комплекс требований к технологическому процессу и средствам оснащения приготовления водосмешиваемых СОЖ:

1. Отсутствие промежуточных баков для приготовления или хранения готовой СОЖ,

являющихся источником биопоражения, отсутствие застойных зон (камер) в диспергирующих устройствах.

2. Прямоточность (без повторяющихся операций и многоступенчатой обработки) процесса перемешивания и диспергирования СОЖ.

3. Комплексное (при сочетании различных способов) воздействие на дисперсную фазу и дисперсионную среду.

4. Возможность автоматизации процесса, защита технологического процесса приготовления от неквалифицированного вмешательства.

5. Отсутствие непосредственного контакта работника с ингредиентами СОЖ - санитарно-гигиеническое требование.

6. Возможность концентрации технологических операций и переходов приготовления и подачи СОЖ в единице оборудования.

7. Высокая степень гибкости оборудования - минимальное время переналадки оборудования при изменении требований к составу и характеристикам используемой СОЖ.

В результате направленного поиска метода диспергирования, во-первых, соответствующего перспективному принципу интенсификации турбулентного трения с высокой степенью кавитации и, во-вторых, с возможностью сочетания процесса диспергирования с напорной подачей приготовленной СОЖ предлагается схема диспергатора (гомогенизатора), базирующегося на принципе работы лабиринтно-винтовых насосов и импеллеров.

Схема воздействия на компоненты СОЖ основывается на многократном пересечении элементарных ячеек (рис. 4), образованных разнонаправленными многозаходными нарезками ротора и статора. В процессе относительного перемещения ротора и статора рабочая нагрузка, передаваемая ротором на объем жидкости в микроячейке, складывается из двух составляющих: подающей (перемещение СОЖ вдоль оси ротора) и сдвигающей (перпендикулярно оси основного движения). При этом рабочая нагрузка заставляет смешиваемые жидкости двигаться вдоль оси насоса со скоростью $V_{ж} = Q / F_{пр}$ и совершать движение с окружной скоростью $V = V_{ж} \operatorname{tg} \alpha$. Развертка поверхностей ротора и статора приведена на рис. 5 (Q - расходная характеристика насоса, $F_{пр}$ - площадь проходного сечения, α - угол подъема нарезки ротора).

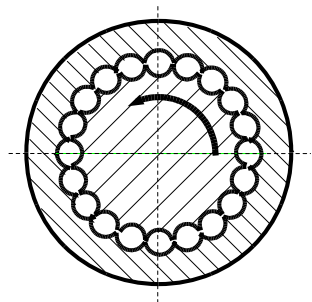


Рис. 4. Торцовое сечение гомогенизатора

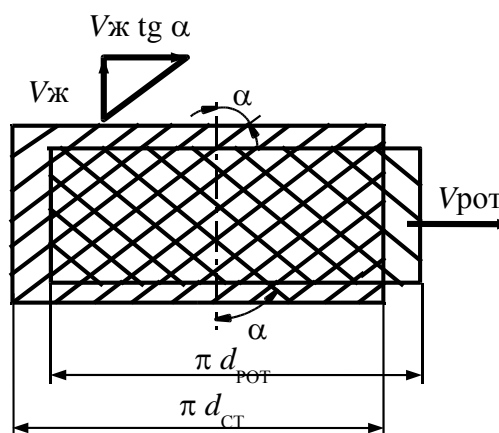


Рис. 5. Развертка поверхностей ротора и статора

Частицы компонентов СОЖ подвергаются комплексу воздействий: перемешиванию за счет множества интенсивных турбулентных течений, образующихся в микрообъемах - ячейках (рис. 6), с высокой степенью кавитации (вплоть до кавитационных микровзрывов), разбиванию за счет переменных по величине и направлению высокочастотных напряжений сдвига и ударных нагрузок при относительной скорости скольжения ротора порядка 20 м/с. В результате указанного воздействия образуется устойчивая коллоидная система с размером частиц эмульгирующей фазы порядка 0,8-1,2 мкм.

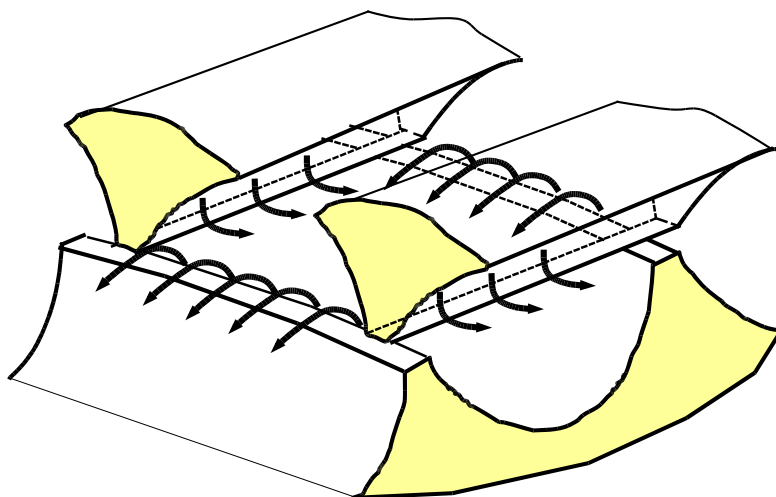


Рис. 6. Образование вихрей в ячейке гомогенизатора

Устройство гомогенизатора обеспечивает выполнение следующих функций:

- получение устойчивых коллоидных систем (типа вода - масло) с размером частиц эмульгирующей фазы менее 0.5–1 мкм;
- получение мелкодисперсных жидкостно-газовых эмульсий;
- всасывание смешиваемых компонентов за счет развиваемого разрежения;
- дозирование поступающих компонентов в потоке;
- смешивание и диспергирование компонентов эмульсии за счет кавитационного и турбулентного воздействий;
- подачу приготовленной эмульсии потребителю под необходимым давлением;
- одновременное выполнение перечисленных операций в момент запроса при прямом движении эмульсии без использования дополнительных устройств и емкостей для приготовления эмульсий;
- отсутствие контактного трения рабочих органов;
- удобство и простоту обслуживания.

Выходные параметры функционирования гомогенизатора - дисперсность масляной фазы, давление, разрежение, расход - достигаются за счет сочетания следующих управляемых факторов: профиль и размеры нормального сечения канавок; количество заходов нарезки ротора и статора; диаметр рабочих органов; частота вращения ротора; соотношение и абсолютное значение длин напорного и вакуумного участков; радиальный зазор между ротором и статором. Результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний позволяют сделать следующие выводы:

- при использовании гомогенизатора в качестве насоса коэффициент полезного действия $KПД = (Q P / N_{эд}) 100\%$, где Q - расход; P - давление; $N_{эд}$ - мощность приводного электродвигателя, составляет порядка 25%, что уступает КПД широко распространенных центробежных и шестеренных насосов. Данный недостаток предопределяет малое использование лабиринтно-винтовых насосов в качестве средств для перекачки жидкостей;
- распространение принципа действия лабиринтно-винтовых насосов в качестве импеллеров связано с возможностью получения высоких давлений при нулевых расходах;
- в режиме гомогенизации приготовление эмульсии с помощью гомогенизатора позволило получить в прямом режиме равномерную эмульсию с полным эмульгированием концентрата. Анализ дисперсности показывает, что около 99% масляной фазы распределены в водной среде в виде капель диаметром 0.8–1.2 мкм. Сравнительный анализ достигаемой дисперсности различными устройствами приведен в табл. 1;
- в вакуумном режиме гомогенизатор не уступает по производительности серийно выпускаемым механическим вакуумным насосам.

Таблица 1

Сравнительная характеристика устройств для приготовления СОЖ

Наименование устройства	Способ воздействия	Достижимая дисперсность, мкм	Удельные энергозатраты, кВт ч/м ³
Мешалка механическая	Турбулентное перемешивание	2...8	1,5
Коллоидная мельница		4...7	7
Магнестрикционный ультразвуковой излучатель	Акустическое воздействие	1...3	2
Гомогенизаторы	Сочетание различных способов воздействия	1...3	5,5
Гидродинамический генератор		3...5	1,5
Проточно-кавитационный смеситель		1...2	1
Роторно-пульсационный аппарат		1...2	1,2
Роторный аппарат с модуляцией потока		0.8...1.2	1
Эжекционно-волновой смеситель		1...3	1,5
Многофункциональный гомогенизатор		0.8...1.2	0,3

Конструкция и функциональные возможности позволяют использовать гомогенизатор в качестве устройства для проточного приготовления СОЖ в автоматизированной централизованной системе приготовления и раздачи, а также в качестве насоса (и диспергатора) для подачи СОЖ в зону резания станка

Возможная область применения гомогенизатора, кроме металлообработки, – использование для получения мелкодисперсных эмульсий в химической, пищевой и других отраслях промышленности.

1. Пат. РФ № 2092237. Устройство для подачи эмульсий на водной основе / В.М.Тихонов, И.Л.Лаптев. – М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам.

I.L. Laptev, V.M. Tikhonov

TECHNOLOGY AND AUTOMATED SYSTEM FOR WATER-BASED CUTTING EMULSION PRODUCTION AND FLUID SUPPLY IN METALWORKING INDUSTRY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Consider preparing emulsion coolant as complex colloidal systems.

Methodology: Analysis of the process equipment, the development of the basic requirements to technology and equipment for cooking and coolant to the cutting zone

Findings: An automated system for providing and preparing the coolant. The system has a competitive advantage over commercially available equipment. Performed laboratory and production testing of the system

Key words: cutting emulsions, metalworking industry, technology, production system.

УДК 621.7

В.Ф. Наумов¹, И.Н. Фролова²**ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ
В МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,¹
ОАО ПКО «Теплообменник»²

Выявлена проблема виртуального описания средств технологического оснащения. Рассматриваются локальные системы координат станка, промышленных роботов, режущих инструментов. Обосновывается необходимость использования глобальной системы координат для реализации виртуальной сборки и оценки формообразующих возможностей технологических металлорежущих систем.

Ключевые слова: технологические металлорежущие системы, локальные системы координат, глобальные системы координат, возможность формообразования заданных поверхностей.

Хорошо известно, что основными факторами успеха в современном промышленном производстве являются уменьшение срока изготовления продукции, снижение ее себестоимости и повышение качества. В современном мире для обеспечения конкурентоспособности изделия оно должно постоянно совершенствоваться и модернизироваться. Это вызывает постоянную необходимость в изменении документации и отладке процесса производства. В свою очередь, для быстрого и успешного ведения производственной деятельности предприятию необходима современная развитая система автоматизированного проектирования. Особенно это касается мелкосерийного и многономенклатурного производства, когда сроки технологической подготовки производства ограничены.

Одной из наиболее сложных сфер деятельности на предприятии является технологическая подготовка производства. В частности, подбор режущего инструмента и приспособления для обработки конкретной детали на имеющемся на предприятии оборудовании. Инженер-технолог должен перебрать и проанализировать набор технологических металлорежущих систем, средств технологического оснащения. И только после этого «примерить» наиболее оптимальные из них для обработки конкретной поверхности на детали. Эта задача решается, как правило, с использованием программных сред, большинство из которых являются редакторами техпроцессов.

Отечественные программные среды для проектирования технологических процессов: САПР ТП «Вертикаль», «ГFlex Технология» и «ТехноПро». Также существует большое множество зарубежных САПР ТП. Все они, по сути, представляют собой обширные базы данных со всевозможными инструментами их дополнения, редактирования и т.д. Но инженер-технолог вынужден перебирать и анализировать набор технологических металлорежущих систем, количество которых прямо пропорционально его опыту и знаниям особенностей работы станков.

В связи с развитием САД-систем, в частности 3D моделирования, представляется целесообразным рутинный и трудоёмкий подбор инструмента, станков и т.д. Инженер-технолог, вводя 3D модель изделия, получает некоторое множество металлорежущих систем с подобранными инструментами, приспособлениями и далее выбирает из них наиболее подходящие варианты. Для этого нужно в автоматическом режиме собрать (соединить) имеющиеся в базе 3D модели станков, инструментов и приспособлений.

Но возникает вопрос: как ориентировать в едином пространстве все эти 3D модели. Ведь каждая из них создана в своей системе координат и ориентирована относительно её. Решением этой проблемы является глобальная система координат (ГСК) для всей технологической металлорежущей системы. В ГСК, следуя определённому алгоритму, можно ориен-

тировать любой станок, любой инструмент, любое приспособление и т.д. и «собирать» их для определения возможности обработки заданных поверхностей

Если оси X , Y и Z имеют фиксированное положение и ориентацию в пространстве, они определяют абсолютную (неподвижную) систему координат, которая называется глобальной системой координат. Эта система отслеживает все объекты в пространстве относительно осей, расположение которых однозначно определено и не меняется во времени.

Если оси не зафиксированы в пространстве, а привязаны к объектам, они определяют локальную систему координат. Эта относительная система координат отслеживает изменение положения, ориентацию и масштаб объектов относительно их локальных осей. Глобальная и локальная системы приведены на рис. 1.

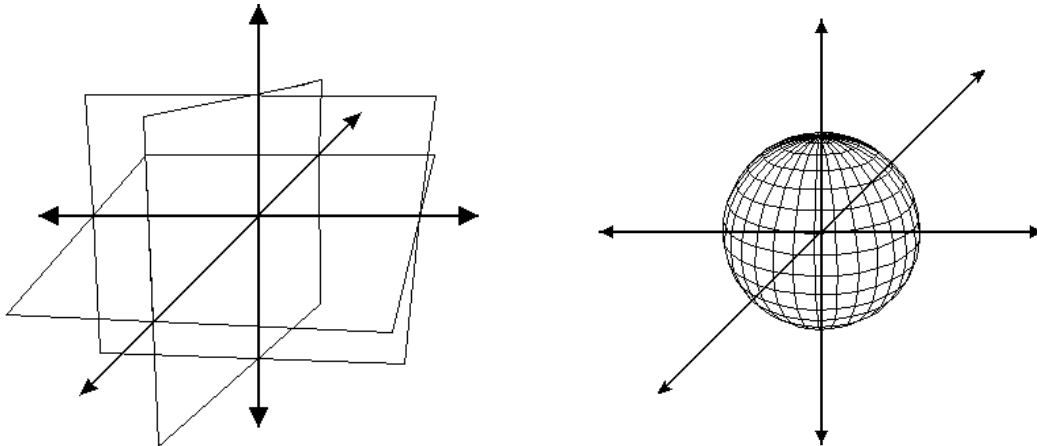


Рис. 1. Системы координат:
а – глобальная; б – локальная

Рассмотрим основные системы координат, используемые в металлообрабатывающей системе.

Система координат станка (СКС)

В соответствии с ГОСТ 23597-79 на станках с ЧПУ принята правая система отсчета координат (рис. 2). Начало СКС обычно совмещается с базовой точкой узла, несущего заготовку, зафиксированного в таком положении, при котором все перемещения рабочих органов станка могли бы описываться положительными координатами. Обозначение координатных осей стандартизовано, чтобы программирование операций обработки не зависело от того, перемещается инструмент или заготовка.

Ось Z_c определяется по отношению к шпинделю, обеспечивающему главное вращательное движение. Положительное направление оси должно совпадать с направлением отвода инструмента от заготовки. Ось X_c располагается горизонтально, параллельно поверхности крепления заготовки. Положительное направление всегда вправо, если смотреть от шпинделя на стол станка.

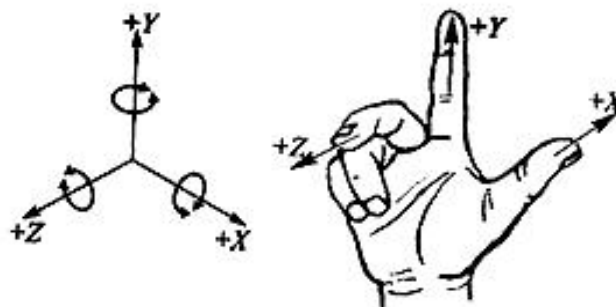


Рис. 2. Правило определения правой прямоугольной системы координат

После выбора осей Xc и Zc ось Yc проставляется таким образом, чтобы образовалась правая система координат. Для этого, глядя на конец оси Z , необходимо повернуть ось X против часовой стрелки на 90° .

Основной недостаток СКС – это произвольный выбор начала системы координат и определение оси Zc по отношению к шпинделю. Станки разного назначения имеют свою систему координат (рис. 3).

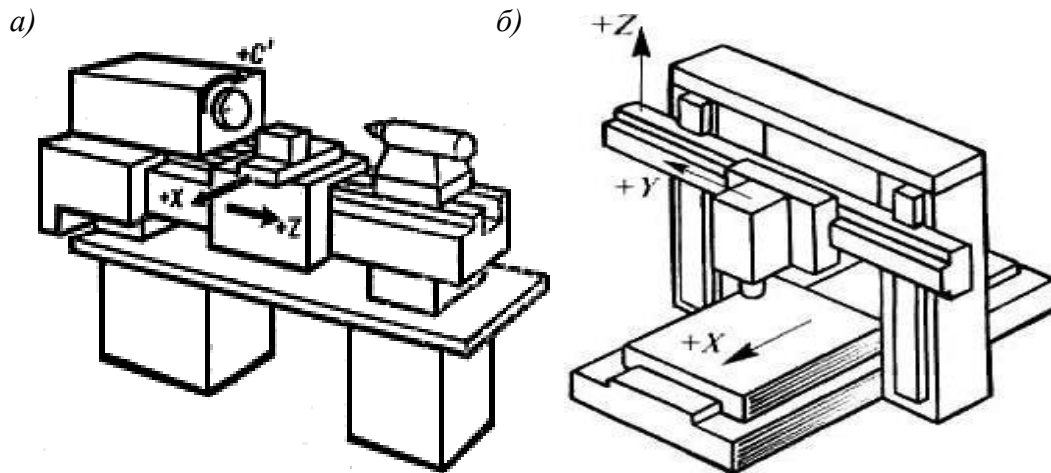


Рис. 3. Расположение осей координат станка:
а – токарного; б - фрезерного

Система координат промышленного робота (СКПР).

Промышленный робот (манипулятор) имеет две главные системы координат.

1. Главная система координат промышленного робота – система координат основания. На рис. 4 она обозначена $X_1 - Y_1 - Z_1$. Ось X_1 должна проходить через проекцию центра C_w рабочего пространства на установочную плоскость основания. Направление оси X_1 может быть определено изготовителем. Ось Y_1 направляется таким образом, чтобы получилась правая прямоугольная система координат.

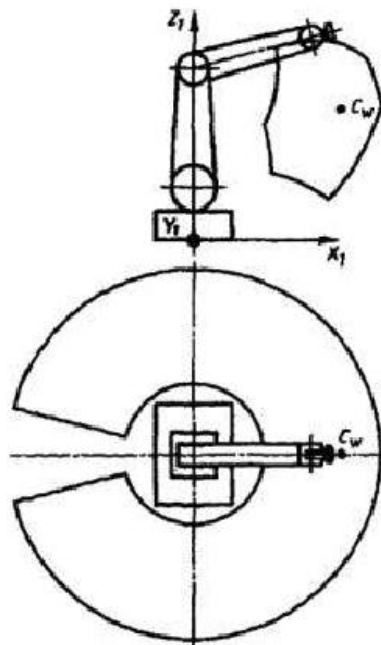


Рис. 4. Расположение осей координат промышленного робота

2. Вторая система координат промышленного робота - система координат механического интерфейса (установочная поверхность на конце исполнительного устройства, к которой присоединяется рабочий орган). На рис. 5 она обозначена $X_M - Y_M - Z_M$.

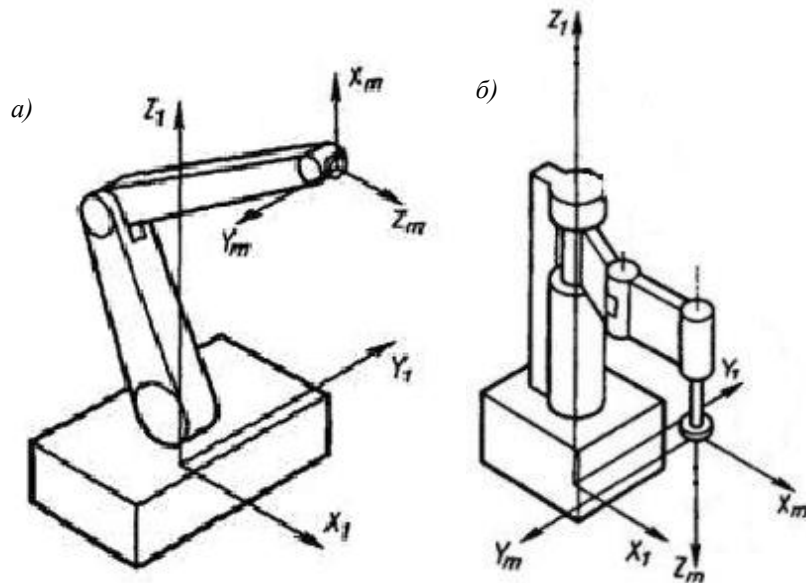


Рис. 5. Расположение системы координат механического интерфейса:
a – оси X_M и Z_M коллинеарны; *б* - оси X_M и Z_M неколлинеарны

Нулевая точка системы координат механического интерфейса должна находиться в центре механического интерфейса. Ось координат Z_M направлена от механического интерфейса к концу рабочего органа. Ось координат X_M находится на пересечении механического интерфейса и плоскости X_1Z_1 или ей параллельной при среднем положении робота по всем осям. Если это невозможно, положение оси X_M должно быть определено изготовителем.

Если оси X_M и Z_1 неколлинеарны, тогда ось X_M должна быть направлена в сторону от оси Z_1 , рис. 5, *б*). Если же они коллинеарны, тогда направление оси X_M выбирается таким же, как и оси Z_1 , рис. 5, *а*).

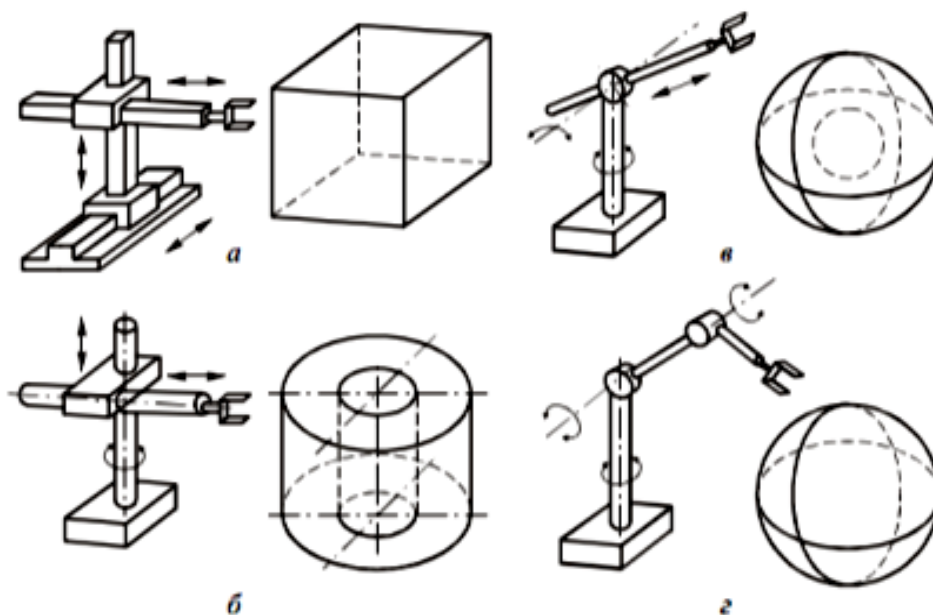


Рис. 6. Виды систем координат промышленных роботов:
a – прямоугольная; *б* – цилиндрическая; *в* – сферическая; *г* – ангулярная

В свою очередь, в зависимости от количества и вида кинематических пар, использованных в конструкции промышленного робота, их движения описываются в четырёх основных системах координат:

1. Робот, работающий в прямоугольной системе координат, рис. 6, а);
2. Робот, работающий в цилиндрической системе координат, рис. 6, б);
3. Робот, работающий в сферической системе координат, рис. 6, в);
4. Робот, работающий в ангулярной (полярной) системе координат, рис. 6, г).

Три поступательные пары, оси которых взаимно перпендикулярны, реализуют схему промышленного робота, работающего в прямоугольной системе координат, с зоной обслуживания в виде параллелепипеда. Две поступательные пары и ротационная пара, ось вращения которой параллельна плоскости, образованной направлением осей поступательных пар, реализует схему промышленного робота, работающего в цилиндрической системе координат с зоной обслуживания в виде полного цилиндра. Две ротационные пары и одна поступательная реализует схему промышленного робота, работающего в сферической системе координат с зоной обслуживания в виде полной сферы. Три ротационные пары реализуют схему робота, работающего в ангулярной системе координат.

Главный недостаток СКПР, как и в случае со станками, это большое разнообразие вариаций расположения координатных осей. Здесь также добавляется вариативность видов систем координат, в которых описываются движение узлов промышленного робота.

Система координат инструмента (СКИ)

В качестве примера рассмотрим фрезу и токарный резец.

Фреза

Ось Z_i совмещена с осью симметрии, ось X_i направлена на кромку зуба и ось Y_i представляется по правилу определения правой прямоугольной системы координат. Локальная система координат фрезы (СКИ) приведена на рис. 7.

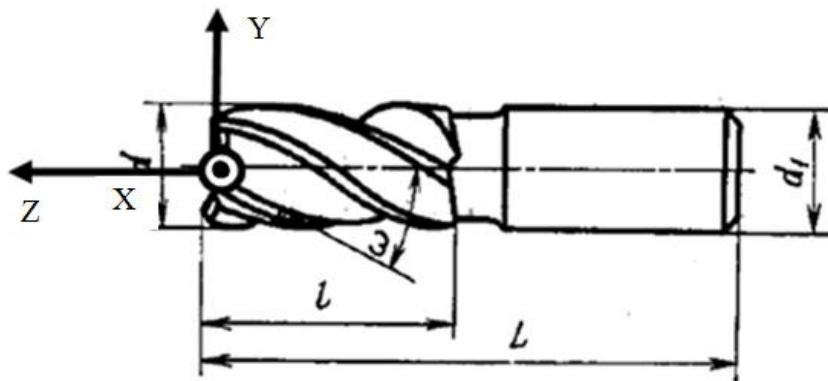


Рис. 7. Расположение осей координат на фрезе

Система координат фрезы описывает геометрию режущей части, все собственные углы инструмента. Так как базирование фрезы на станке или приспособлении происходит не по исполнительным, а по базовым поверхностям необходим переход к ГСК.

Локальная или собственная система координат токарного резца располагается в его вершине. Ось Z направлена вдоль державки, ось X направлена на рабочую зону. Направление оси Y определяется по правилу определения правой системы координат. Собственная система координат резца приведена на рис. 8. У резца, как и у фрезы, СКИ описывает геометрию режущей части.

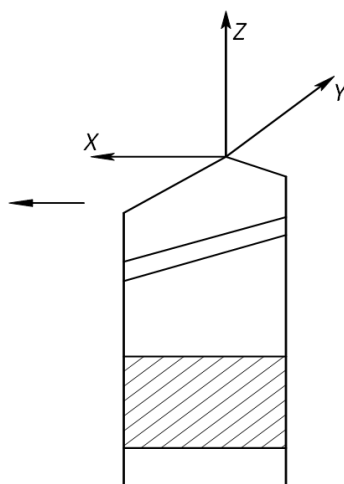


Рис. 8. Расположение осей координат на резце

Выводы

Как видно из рассмотренных основных систем координат, используемых в металлообрабатывающей системе, каждая из них индивидуальна и привязана к своему объекту. А это значит, что сопоставить и подобрать подходящие друг к другу объекты металлообрабатывающей системы для оценки ее формообразующих возможностей весьма проблематично.

Однако, если подходить к этой проблеме с точки зрения реализации виртуальной сборки составных частей в единую технологическую металлорежущую систему, то ввод глобальной системы координат позволяет отслеживать изменения положений инструмента относительно рабочей зоны станка и оценивать возможность формообразования заданных поверхностей.

1. Автоматизированное создание структуры технологического процесса: монография / И.Н. Фролова [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – 183 с.

Дата поступления
в редакцию 04.12.2013

V.F. Naumov¹, I.N. Frolova²

GLOBAL COORDINATE SYSTEM IN THE METAL SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC PDC «Теплобмeнник»²

Purpose: Identify the problem virtual descriptions of technological equipment in the local coordinate system of the machine, industrial robots, cutting tools.

Methodology: Using the global coordinate system for the implementation of virtual assembly and formative assessment opportunities technological metal systems.

Findings: The necessity of using the global coordinate system for the implementation of virtual assembly and formative assessment opportunities technological metal systems.

Key words: metal processing systems, local systems, global coordinate system, the possibility of forming a given surface.

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин¹, И.Л. Лаптев¹, Д.А. Шатагин¹, Ю.В. Вытнов², С.В. Голубев²**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NVIDIA CUDA В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LABVIEW**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева¹,
«ОАО ОКБМ Африкантов»²

Изложена методология оценки состояния режущего инструмента на основе фрактального и анализа виброакустического сигнала с использованием параллельных вычислений nVidia CUDA в графической среде обработки LabVIEW, в режиме реального времени.

Ключевые слова: износ инструмента, фрактальный анализ, nVidia CUDA, LabVIEW.

Состояние технологических систем во многом определяет качество выпускаемой продукции, поэтому своевременная оценка динамических показателей и степени износа оборудования играет важную роль на производстве. Для мониторинга работы металлорежущих станков используют системы диагностики, основанные на сборе информации о параметрах оборудования, их последующей обработке и принятия соответствующего решения. Учитывая тот факт, что система резания является сложной, самоорганизующейся системой [1], включающей в себя большое количество параметров с нелинейными связями, необходимо контролировать только те, которые вносят существенный вклад в общее состояние системы и её развитие. Такие параметры называются *параметрами порядка*.

Изучением сложных, нелинейных, самоорганизующихся систем занимается наука синергетика. Как показывают исследования [2], одним из параметров порядка системы резания является степень износа режущего инструмента, оцениваемая косвенно в зависимости от производственных условий. Поэтому оценка и прогнозирование износа режущего инструмента в режиме реального времени – одна из актуальных задач в системе общей диагностики состояния технологических систем. Наиболее полную картину о состоянии режущего инструмента в процессе резания можно получить по виброакустическому сигналу, получаемому из зоны резания. Данный сигнал несет информацию о текущем состоянии инструмента и позволяет спрогнозировать картину износа, используя специальные методы и подходы теории синергетики и искусственного интеллекта. Однако учитывая тот факт, что обработка резанием является высокодинамичной и быстро эволюционирующей во времени. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени вызывает ряд трудностей и вопросов, связанных со скоростью обработки сигнала и принятия решения. Для реализации алгоритмов нелинейной динамики в реальном времени для оценки состояния режущего инструмента необходимо использовать современные методы высокопроизводительных вычислений.

Синергетический подход к оценке состояния режущего инструмента

Как отмечалось ранее, система резания – сложная, нелинейная самоорганизующаяся система, поэтому для оценки состояния режущего инструмента необходимо использовать подходы теории синергетики. Для качественной оценки состояния и поведения динамической системы в теории синергетики используется понятие фазового пространства системы. Координаты, описывающие точку в фазовом пространстве системы, должны давать точное представление о состоянии и поведении системы во времени. Если состояние системы в фазовом пространстве описывается двумя координатами, то такое пространство называется фа-

зовой плоскостью. Так, колебание гармонического осциллятора можно представить в координатах скорости и перемещения на фазовой плоскости.

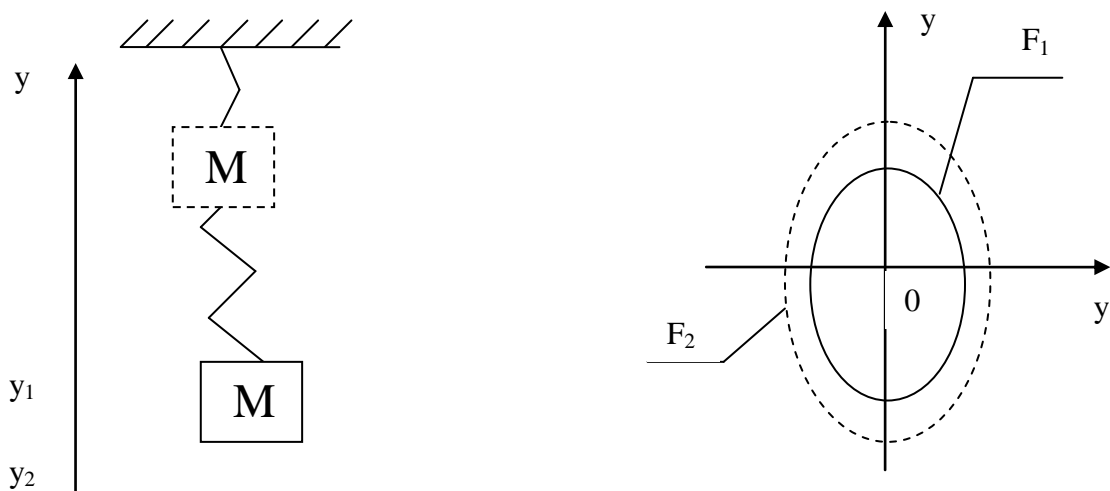


Рис. 1. Фазовый портрет линейного гармонического осциллятора без трения

На рис. 1 показан фазовый портрет гармонического осциллятора без трения в координатах скорость y' и перемещение y , выведенного из состояния равновесия 0 из точки y_1 . Данное отображение делает возможным определение динамического состояния по значениям параметров на фазовой плоскости. След, который оставляет точка на фазовой плоскости, называется фазовой траекторией. В данном случае фазовая траектория обозначается как F_1 . Из рис. 1 видно, что изменения начальных условий приведет к изменению и на фазовой плоскости. Так, изменение начального положения массы приведет к изменению фазовой траектории. Если задать начальное отклонение от положения равновесия большим, чем в предыдущем случае $y_1 < y_2$, получим новую фазовую траекторию F_2 .

Таким образом, изменяя начальные условия, мы получим целое семейство фазовых траекторий для каждого конкретного случая. Фазовая траектория, к которой стремится система во времени, называется аттрактором. В данном случае изменение начальных условий приведет к изменению аттрактора. Однако вид аттрактора останется одинаковым для всех случаев. Это означает, что система не меняет характер движения. Вид аттрактора может меняться только при условии резкого изменения какого-либо параметра или закона движения. Так, при добавлении к закону движения силы трения или, превращая в ноль какой-либо параметр, мы получим совершенно другую картину. На рис. 2 показан фазовый портрет осциллятора с учетом силы трения.



Рис. 2. Фазовый портрет линейного гармонического осциллятора с учетом трения

Из рис. 2 видно, что колебания у выведенного из состояния равновесия 0 из точки u_1 осциллятора со временем затухают. Это указывает на то, что аттрактором системы будет являться устойчивый фокус. Изменяя начальные условия в широком диапазоне, система всегда стремится к состоянию равновесия. Это свидетельствует о высокой степени устойчивости системы и широкой области притяжения аттрактора. В отличие от линейного осциллятора, система резания имеет более сложную структуру и законы эволюции. Большое влияние на поведение оказывают стохастические факторы и нелинейные диссипативные параметры системы. Именно поэтому не предоставляется возможным точное описание поведения системы во времени линейными дифференциальными уравнениями. Для оценки состояния режущего инструмента необходимо реконструировать аттрактор системы резания по полученному временному ряду и определить его фрактальную размерность.

Реконструкция аттрактора динамической системы методом задержек

Для реконструкции аттрактора методом задержек требуется определить размерность фазового пространства динамической системы. Необходимо знать, сколькими координатами описывается точка полученного аттрактора. Для решения этой задачи следует рассчитать фрактальную размерность аттрактора [2].

Фрактальная размерность является количественной характеристикой хаотичности исследуемого сигнала. По величине фрактальной размерности можно судить, насколько хаотична динамика исследуемой системы. Знание величины фрактальной размерности требуется при реконструкции аттрактора методом задержек, для расчета минимальной размерности фазового пространства m , а также для предварительной оценки корректности такой реконструкции, а именно минимального числа точек M временного ряда, при котором картина реконструкции будет корректной $M > M_{\min} = 10^{2+0.4D}$, где D – фрактальная размерность.

Одним из наиболее распространенных алгоритмов определения фрактальной размерности является метод расчета поточечной размерности [2]. Результатом работы алгоритма является значение фрактальной размерности Хаусдорфа D_0 . Данный алгоритм обладает высокой точностью. Экспериментальные исследования показывают, что при длине выборки порядка 100 000 точек погрешность предложенного алгоритма вычисления фрактальной размерности D_0 не превышает 5%.

Расчет значения размерности производится поточечным алгоритмом. В основе метода расчета размерности фазового пространства m лежит теорема о вложении, которая утверждает, что $m \geq \frac{2}{D} + 1$ – формула Манэ, где D – фрактальная размерность, означает округление до ближайшего сверху числа.

Размерность фазового пространства m дает возможность определить число степеней свободы реконструируемой динамической системы. Система с размерностью фазового пространства m характеризуется числом степеней свободы $n = m/2$.

Для реконструкции аттрактора также требуется знать частоту и амплитуду доминирующих гармоник во временном ряду. Для этих целей необходимо получить временной ряд по виброакустическому сигналу из зоны резания и произвести частотный анализ.

Система по снятию виброакустического сигнала из зоны резания и получения временных рядов

Для получения временного ряда, характеризующего динамику процесса резания, используется виброакустический сигнал из зоны резания. Регистрация виброакустического сигнала проводится с помощью вибродатчиков, закрепленных вблизи зоны резания и ориентированных по заранее определенным осям. В случае токарной обработки датчики вибрации размещаются на корпусе резца. Оптимальным является наличие одного трехкоординатного датчика, позволяющего получать напряжение, пропорциональное виброускорению по трем осям одновременно.

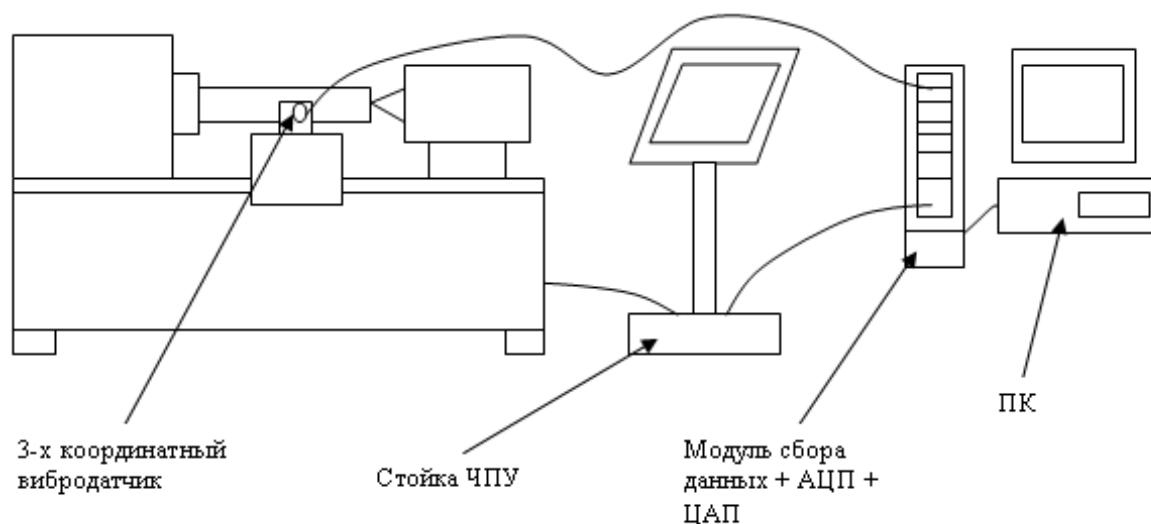


Рис. 3. Схема установки по снятию сигнала виброакустической эмиссии

Полученный аналоговый сигнал с датчиков фильтруется и преобразуется в цифровой сигнал при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Следующим этапом является передача цифрового сигнала на ПК и реконструкция аттрактора системы резания с целью дальнейшего анализа и принятия решения с генерацией управляющего воздействия. Управляющее воздействие передается на стойку ЧПУ станка, где и происходит корректировка его работы. Этапы получения и обработки сигнала представлены на рис. 4.

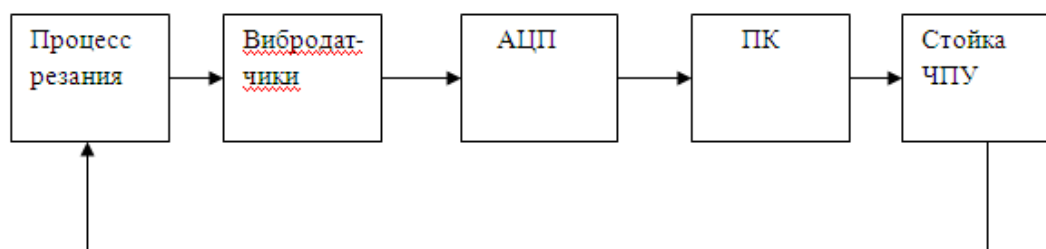


Рис. 4. Этапы получение временного ряда, характеризующего динамику процесса резания и генерации управляющего воздействия

Оцифровка и обработка сигнала с использованием программно-аппаратного комплекса National Instruments

Оцифровка и обработка полученного сигнала является ответственным этапом в диагностике состояния режущего инструмента. Комплексное решение в данном вопросе предлагает фирма National Instruments (NI). NI является лидером в области технологии виртуальных приборов, а также изготовлении аппаратного и программного обеспечения для систем автоматизированного тестирования. Флагманским программным продуктом компании является среда графического инженерного программирования LabVIEW.

Удобство использования данной системы заключается в полной интеграции как аппаратных, так и программных средств в единую систему сбора и анализа данных на основе ПК. В качестве устройства для оцифровки сигнала компания NI предлагает компактную установку, состоящую из АЦП NI 9218 и модуля сбора данных NI cDAQ 9172. Данная установка отправляет оцифрованный сигнал на ПК с помощью USB провода.



Рис. 5. Общий вид установки по оцифровке данных NI

Обработка полученного сигнала с целью реконструкции аттрактора системы резания и принятия решения проводится на программном обеспечении собственной разработки, созданной на основе инженерного графического языка программирования LabVIEW (кафедра «Технология и оборудование машиностроения» НГТУ им. Р.Е. Алексева).

Преимуществом графического языка программирования LabVIEW является наличие основных виртуальных приборов и большое количество реализованных функций в виде подключаемых библиотек, широко распространенных в области обработки сигналов. Например, стандартными функциями являются: «Быстрое преобразование Фурье», «Оконное преобразование Фурье», «Определение спектра мощности сигнала», «Осциллограф», «Wavelet преобразование» и т.д. Графический язык программирования LabVIEW отличается высоким удобством ввода и вывода информации и параметров.

Технологии параллельных вычислений nVidia CUDA в среде графической разработки LabVIEW при реконструкции аттрактора системы

Для получения частотных характеристик динамических систем широко используют спектральный анализ виброакустического сигнала. Наибольшее распространение в качестве метода спектрального анализа получило «Быстрое преобразование Фурье» и «Оконное преобразование Фурье». Для реконструкции аттрактора методом задержек нам необходимо выявлять доминирующие частоты и их амплитуды в режиме реального времени, поэтому предъявляются высокие требования к скорости обработки временных рядов. Современной тенденцией в повышении производительности является применение параллельных вычислений, основывающихся на подключении графического процессора (GPU) для расчетов совместно с центральным процессором (CPU). Лидером в области параллельных вычислений на GPU является фирма nVidia с технологией CUDA.

CUDA – это архитектура параллельных вычислений от nVIDIA, позволяющая существенно увеличить вычислительную производительность, благодаря использованию GPU (графических процессоров). Направление вычислений эволюционирует от «централизованной обработки данных» на центральном процессоре до «совместной обработки» на CPU и GPU. Для реализации новой вычислительной парадигмы компания nVIDIA изобрела архитектуру параллельных вычислений CUDA, на данный момент представленную в графических процессорах GeForce, ION, Quadro и Tesla и обеспечивающую необходимую базу разработчикам ПО. Платформа параллельных вычислений CUDA обеспечивает набор расширений для языков C и C++, позволяющих выразить как параллелизм данных, так и параллелизм задач на уровне мелких и крупных структурных единиц.

Для реализации возможностей параллельных вычислений в среде разработки LabVIEW фирма National Instruments анонсировала подключаемый модуль GPU Analysis Toolkit. Данный модуль представляет собой набор подключаемых библиотек для работы с

GPU в LabVIEW. Для работы GPU Analysis Toolkit необходимо наличие у ПК видеокарты nVidia с поддержкой технологии CUDA и установленные библиотеки CUDA Toolkit.

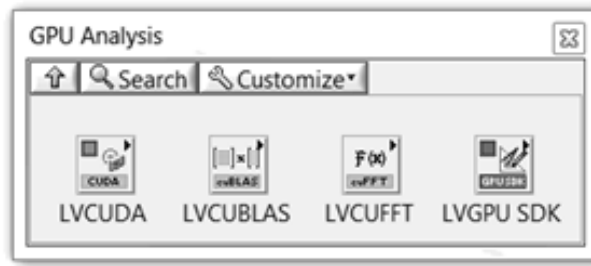


Рис. 6. Библиотеки GPU Analysis Toolkit в LabVIEW

Стандартным набором в GPU Analysis Toolkit являются библиотеки LVCUDA, LVCUBLAS, LVCUFFT, LVGPU SDK. Библиотека LVCUDA необходима для инициализации GPU в LabVIEW и выделения памяти под расчеты. LVCUBLAS является библиотекой линейной алгебры и содержит основные операции с матрицами. LVCUFFT – библиотека, реализующая прямое и обратное преобразование Фурье на GPU. LVGPU SDK включает дополнительные инструменты для работы с GPU. Реализация БПФ с GPU подразумевает несколько специальных этапов в LabVIEW.

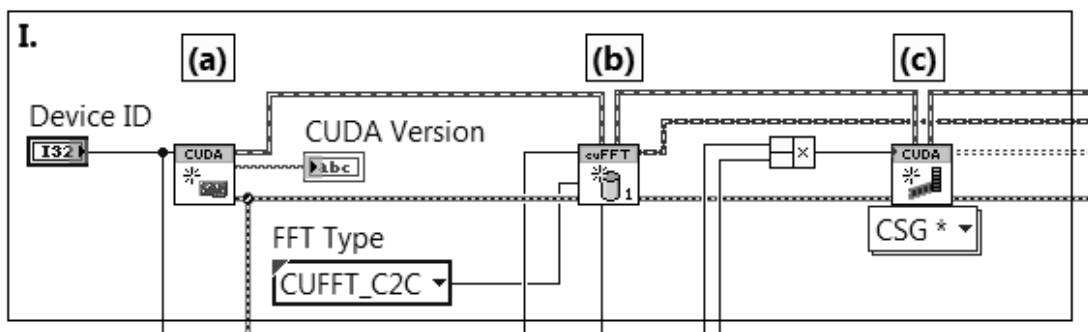


Рис. 7. Инициализация GPU ресурсов

Для начала работы с GPU необходимо подключить устройство (рис. 7, a). Оператор подключения GPU выбирается из библиотеки LVCUDA. После этого CPU сможет отдавать часть данных вычислений на GPU. Далее необходимо подготовить GPU к вычислению БПФ, для этого следует подключить библиотеку cuFFT из LVCUFFT (рис. 7, б). Теперь выделить память для хранения данных на GPU. Делается это при помощи библиотеки Allocate Memory из LVCUDA (рис. 7, c), где требуется выбрать тип данных для работы.

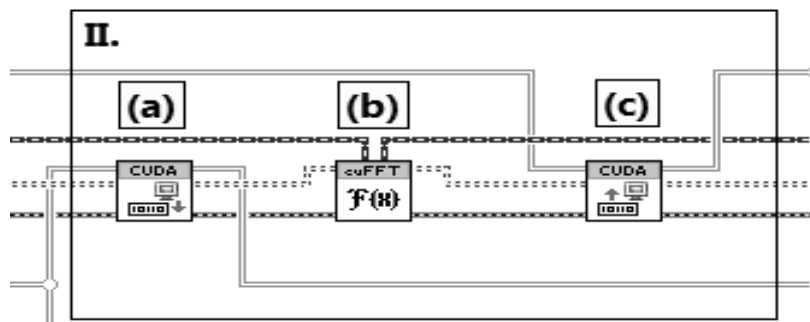


Рис. 8. Вычисления БПФ на GPU

Непосредственно БПФ осуществляется загрузкой данных временного ряда, полученного из зоны резания, в буфер на GPU (рис. 8, *a*) с последующей обработкой в библиотеке cuFFT (рис. 8, *b*) с последующей выгрузкой из буфера (рис. 8, *c*). Для загрузки данных временного ряда используется библиотека Download Data из LVCUDA. Обработка данных происходит с помощью библиотеки FFT из LVCUFFT. Выгрузка данных происходит за счет оператора Upload Data из LVCUDA.

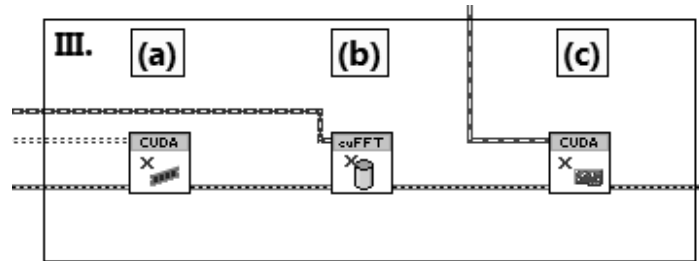


Рис. 9. Высвобождение GPU ресурсов

Для завершения параллельных вычислений необходимо произвести высвобождение GPU ресурсов. На данном этапе следует отключить выделенную память оператором Free Memory из LVCUDA (рис. 9, *a*) из LVCUDA, отключить библиотеку БПФ от GPU (рис. 9, *b*) оператором Release Library из LVCUFFT, отключить GPU для работы с данными в LabVIEW оператором Release Device из LVCUDA.

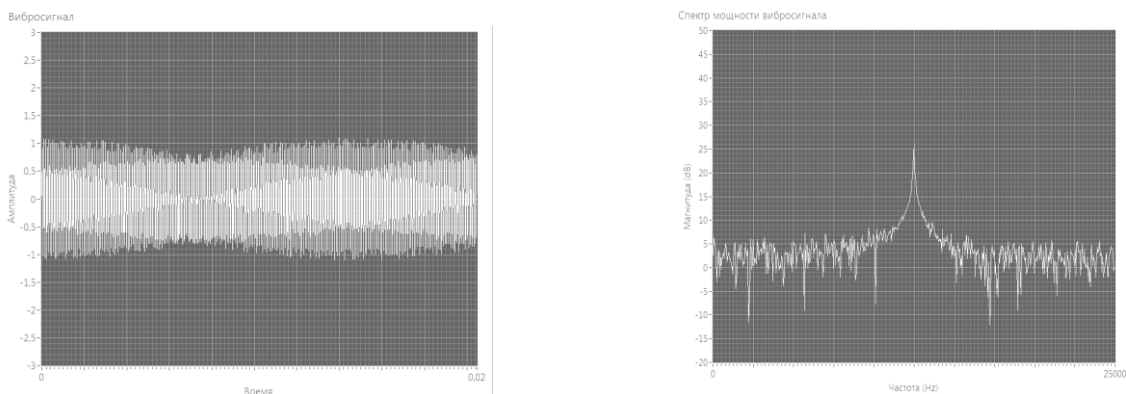
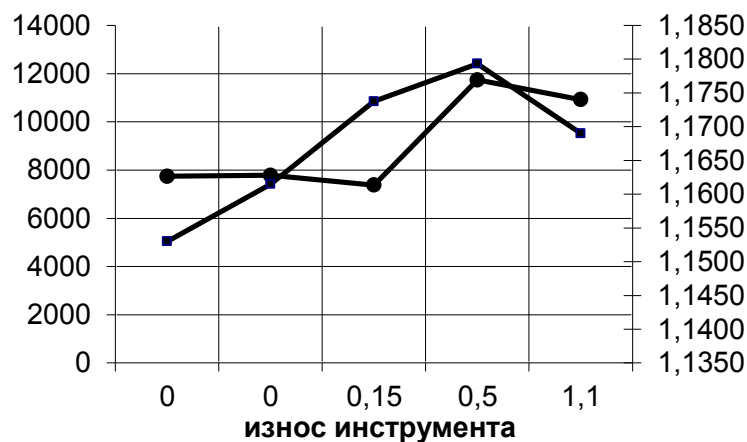


Рис. 10. Сигнал и его доминирующая частота



—●— мощность доминирующей частоты —■— фрактальная размерность

Рис. 11. Изменение фрактальной размерности и мощности доминирующей частоты в сигнале в зависимости от степени износа

По полученному спектру мощности вычисляется доминирующая частота и её амплитуда для реконструкции аттрактора и определения степени износа инструмента.

Используя теорему Такенса [2], можно осуществить реконструкцию аттрактора и определить его фрактальную размерность. Как показывают экспериментальные данные [2], степень износа инструмента находится в определенной зависимости от фрактальной размерности аттрактора системы резания.

Таким образом, включая в алгоритм реконструкции аттрактора и определения фрактальной размерности параллельные вычисления nVidia CUDA, становится возможным осуществлять оценку состояния режущего инструмента в режиме реального времени.

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю. Г.** Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика, управление / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 296 с.
2. **Кабалдин, Ю.Г.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. – 201 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

Yu.G. Kabaldin¹, I.L. Laptev¹, D.A. Shatagin¹, Y.V Vytnov², S.V. Golubev²

EVALUATION OF CUTTING TOOL IN REAL TIME BASED APPROACHES NONLINEAR DYNAMICS USING NVIDIA CUDA SOFTWARE ENVIRONMENT LABVIEW

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Develop a methodology for assessing the state of the cutting tool based on fractal analysis and vibroacoustic signal using nVidia CUDA parallel computing in the graphics processing environment LabVIEW, in real time.

Methodology: Reconstruction of the attractor of a dynamical system and evaluation of its fractal dimension of parallel computing on SALT nVidia CUDA.

Findings: A methodology to assess the state of the cutting tool based on fractal analysis and vibroacoustic signal using nVidia CUDA parallel computing in the graphics processing environment LabVIEW, in real time.

Key words: tool wear, fractal analysis, nVidia CUDA, LabVIEW.

УДК 621.9

А.М. Кузьмишина¹, О.В. Кретинин¹, Е.Е. Власов¹, С.В. Серый²**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИНАРНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ
«ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ» НА ОСНОВЕ
КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CUDA**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет²

Изложен эффективный и быстрый способ математического моделирования наноструктур «из первых принципов» (ab-initio), в частности, свойств наноструктур. Приведены некоторые результаты исследований прочностных свойств нескольких стабильных бинарных соединений и тугоплавких соединений путем квантово-механических расчетов с использованием технологии CUDA. Произведена оценка увеличения коэффициента производительности для метода GPU-вычислений на основе CUDA-технологии. Показано, что использование технологии CUDA позволяет существенно снизить производительность вычислений.

Ключевые слова: интерметаллиды, квантово-механические расчеты, технология CUDA.

Бинарные структуры являются комбинациями Al, Si, Mg, Cu, Fev пространственных конфигурациях типа FCC, NaCl, Cu₂Mg, ZnS, CaF₂, CsCl, AlFe₃ и др. (B1, B2, B3, C1, C15, A15, D03, L12, ...). Были рассчитаны равновесные состояния систем, модули упругости и полная энергия на атом для данных соединений и сравнение результатов такого квантово-механического моделирования с известными экспериментальными данными. Все расчеты выполнялись на программном обеспечении (ПО) QuantumEspresso и Abinit. Данное ПО основано на теории функционала плотности (ТФП), для расчетов применялись GPU-версий ПО.

Алюминий, магний, медь, железо и их сплавы являются распространенными компонентами для разработки интерметаллидов, обладающими новыми, выдающимися свойствами. Большая популярность этих сплавов (интерметаллидов) обусловлена набором их общих функциональных свойств, механических свойств, плотностью, коррозионной стойкостью, обрабатываемостью и т.п. Легкие металлические сплавы, такие как магниевые и алюминиевые сплавы, в настоящее время все более необходимы для применения в автомобильной и авиационной промышленности. Они особенно выгодны для существенного уменьшения операционных расходов на производство высокотехнологичной продукции, и продукция отличается высокими эксплуатационными характеристиками. Эти сплавы обычно содержат незначительные присадки некоторых других элементов (кремний, никель, марганец), которые, как известно, улучшают свойства материалов, но имеют более сложные фазовые диаграммы. Оценка таких сложных систем – очень непростая задача, так как различные составные элементы в различных пропорциях могут образовывать различные фазы, и выбор состава интерметаллида, оптимального по свойствам, зависит от соотношения между его составляющими, которое сложно подобрать эмпирически, но можно рассчитать путем квантово-механического математического моделирования [1].

Предполагается, что таким образом будут разработаны новые квазикристаллические наноматериалы с уникальным сочетанием прочности, низким коэффициентом трения и высокой термической стабильностью, что делает их перспективными для использования в машиностроении и других областях.

Ab-initio calculations. Расчеты из первых принципов в этой работе были основаны на теории функционала плотности (ТФП), в базисе «плоских волн» (PAW), реализованном в ПО QuantumEspresso и Abinit [2, 3]. Расчеты объемных материалов проведены с использованием

зоны Бриллюэна (Brillouinzone) на основе центрированной схемы Монхорста-Пака (Γ -centered Monkhorst-Pack) [4] с размером суперячейки, постепенно увеличивающимся до $6 \times 6 \times 6$.

Объемный модуль упругости был получен на основе анализа значений кривой энергетических состояний по методу Бирча-Мурнагана (Birch-Murnaghan) [5], и которые вычислялись без релаксации атомных позиций (табл. 1).

Таблица 1

Расчет свойств интерметаллидов AlCu, AlFe, AlMg, AlSi, CuFe

	AlCu - a(A), E(eV), B(GPa)	AlFe - a(A), E(eV), B(GPa)	AlMg - a(A), E(eV), B(GPa)	AlSi - a(A), E(eV), B(GPa)	CuFe - a(A), E(eV), B(GPa)
'nacl'	a=5.07 E=-3.58 B=83.41	a=4.94 E=-5.84 B=376.6	a=5.75 E=-2.16 B=36.42	a=5,24 E=-3.71 B=76.36	a=4.84 E=-3.28 B=111.8
'cu2mg'	-	a=6.63 E=-7.33 B=177.3	-	-	-
'f2ca'	a=5.83 E=-4.00 B=85.45	a=5.82 E=-5.59 B=104.6	-	a=6.13 E=-3.62 B=73.59	-
'alfe3'	a=5.96 E=-4.13 B=116.8	a=5.67 E=-7.81 B=181.0	-	-	a=5.7 E=-3.44 B=134.0
'al3fe'	-	a=6.11 E=-5.14 B=704.9	-	-	-
'aucu3'	a=3.94 E=-3.79 B=85.93	a=3.57 E=-7.62 B=204.7	a=4.15 E=-3.16 B=64.64	a=4.055 E=-3.56 B=96.74	a=3.61 E=-3.83 B=172.6
'au3cu'	a=3.71 E=-3.92 B=142.9	a=3.80 E=-5.18 B=129.7	a=4.4 E=-2.04 B=65.00	a=4.00 E=-4.04 B=74.88	a=3.64 E=-3.49 B=153.2
'cr3si'	-	a=4.82 E=-5.22 B=118.7	-	-	-
'sirc3'	a=4.68 E=-3.9 B=105.5	a=4.50 E=-7.62 B=227.2	-	-	a=4.62 E=-3.97 B=192.3
'cscl'	a=3.01 E=-3.88 B=122.8	a=2.88 E=-6.70 B=168.8	a=3.41 E=-2.51 B=45.57	a=3.19 E=-3.84 B=102.1	a=2.89 E=-3.69 B=161.7

Чтобы проверить эффективность применения GPU для наиболее трудоемких BLAS подпрограмм (подпрограммы линейной алгебры, используемые в любом квантово-механическом ПО) была произведена замена на аналогичные подпрограммы, но выполняемые на GPU, а не на CPU.

Это было достигнуто путем линковки ПО QuantumEspresso и Abinit с библиотекой CuBLAS (аналогом библиотеки BLAS), но реализованной на основе CUDA-технологии и выполняемой на GPU.

Таким образом, были заменены основные процедуры библиотеки BLAS: DGEMM, Dsyr2k и Dsyrk на аналогичные, но выполняемые на GPU. В итоге было получено в среднем 40-50% ускорения вычислений по времени.

Следует добавить, что с увеличением масштаба системы (числа атомов), число вызо-

вов процедур BLAS будет уменьшаться с O(N³) до O(N²). Таким образом, в больших системах относительная часть вызовов BLAS-процедур увеличивается и эффективность применения GPU должна увеличиться, т.е. возможно существенно большее увеличение быстродействия. С другой стороны, для больших систем требования к объему памяти также быстро увеличивается, и моделирование больших систем должно испытывать сложности с нехваткой памяти на GPU. Но проблема может быть решена путем параллельных вычислений на нескольких GPU и нескольких вычислительных узлах, чтобы тем самым увеличить общий объем суммированной оперативной памяти (табл. 2).

Таблица 2

Расчет свойств интерметаллидов MgCu, MgFe, SiCu, SiFe, SiMg

	MgCu- a(A), E(eV), B(GPa)	MgFe - a(A), E(eV), B(GPa)	SiCu - a(A), E(eV), B(GPa)	SiFe - a(A), E(eV), B(GPa)	SiMg - a(A), E(eV), B(GPa)
'nacl'	a=5.26 E=-2.29 B=49,59	a=5.22 E=-2.29 B=56.51	a=4.98 E=-4.25 B=100.2	a=4.78 E=-7.1 B=124.2	a=5.52 E=-3.00 B=52.86
'mgcu2'	a=7.03 E=-3.00 B=104.7	a=7.08 E=-2.89 B=95.81	-	-	-
'caf2'	-	-	a=5.61 E=-4.37 B=102.8	-	a=6.37 E=-2.94 B=55.06
'alfe3'	a=5.99 E=-2.93 B=95.65	-	-	a=5.56 E=-8.32 B=189.8	-
'aucu3'	a=3.81 E=-3.06 B=103.9	a=3.79 E=-3.34 B=116.4	a=3.67 E=-4.22 B=157.4	-	-
'au3cu'	-	a=4.24 E=-1.95 B=54.48	-	-	-
'sirc3'	-	-	-	-	a=5.45 E=-2.37 B=44.89
'cscl'	a=3.15 E=-2.55 B=73.62	a=3.16 E=-2.66 B=86.43	-	a=2.77 E=-7.7 B=212.9	-

При расчетах влияния упрочняющих примесей на карбид и нитрид титана нами использовались элементарные ячейки размером 4x4x4 достаточного размера для изучения влияния примесей переходных металлов (Nb, V, Mo, Mg, Ta, Zr) на свойства TiC и TiN в массиве (примесь составила около 1,5%).

Далее представлены энергетические зависимости влияния примесей на основе квантово-механических расчетах. Нитриды и карбиды титана были первыми тугоплавкими соединениями, использующиеся в качестве износостойких покрытий для режущего инструмента. Предлагается добиться упрочнения покрытий из нитрида и карбида титана введением примесей порядка 1-2 % из различных элементов.

При осаждении карбидных и нитридных покрытий термическая стабильность поверхностных слоев твердосплавных пластин и сопротивляемость пластическому разрушению

возрастают, кроме того, образуется сплошной карбидный каркас, что, наряду с высокой твердостью, повышает сопротивляемость пластическому разрушению твердосплавной основы.

В этой связи упрочнение карбидных и нитридных покрытий для повышения работоспособности режущего инструмента представляет особый интерес. Квантово-механическое моделирование с целью получения новых составов покрытий, обладающих более высокой износостойкостью, с использованием технологий CUDA позволяет существенно уменьшить объем вычислительных процедур.

На рис. 1 приведена схема при проведении квантово-механических расчетов.

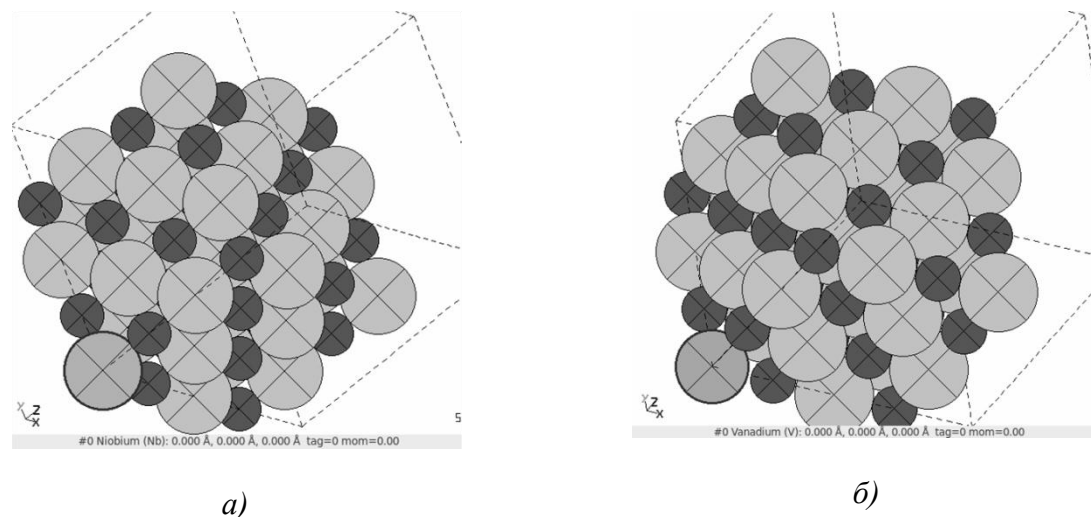


Рис. 1. Введение атома примеси:
a – ниобия; *б* – ванадия в супер-ячейку массива нитрида титана

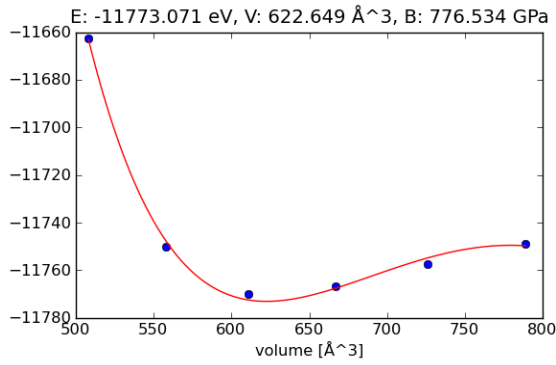
На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты расчетов. В табл. 3 показаны расчетные характеристики новых составов тугоплавких соединений.

Таблица 3

Параметр решетки *a*, объемный модуль *B*, полная энергия E_{tot} для TiN и TiC с примесями V, Nb, Ta, Cr, Mo, Zr

Нано-структура	<i>a</i> (Å)	<i>B</i> (GPa)	E_{tot} (eV/atom)	Нано-структура	<i>a</i> (Å)	<i>B</i> (GPa)	E_{tot} (eV/atom)
TiN	4,22	650	-184,12	TiC	4,33	400	-126,14
TiN (V)	4,83	799	-185,20	TiC (V)	4,29	687	-126,72
TiN (Nb)	-	793	-184,86	TiC (Nb)	4,34	696	-126,36
TiN (Ta)	4,99	800	-184,79	TiC (Ta)	4,38	702	-126,31
TiN (Cr)	4,82	772	-186,68	TiC (Cr)	4,28	686	-128,17
TiN (Mg)	4,69	752	-183,27	TiC (Mg)	4,12	661	-124,71
TiN (Zr)	4,85	777	-183,95	TiC (Zr)	4,26	682	-125,44

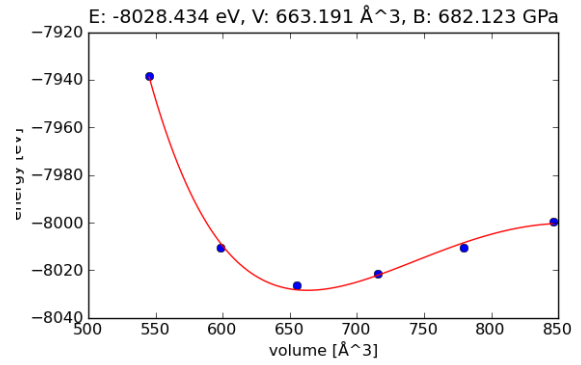
Примесь Zr в нитрид титана (один атом примеси на ячейку 4x4x4 атомов TiN)



Модуль упругости – **776 ГПа**

a)

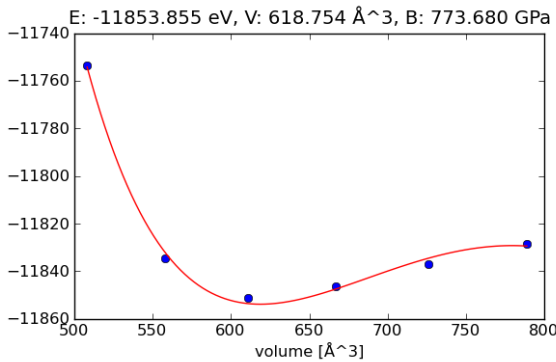
Примесь Zr в карбид титана (один атом примеси на ячейку 4x4x4 атомов TiC)



Модуль упругости – **682 ГПа**

б)

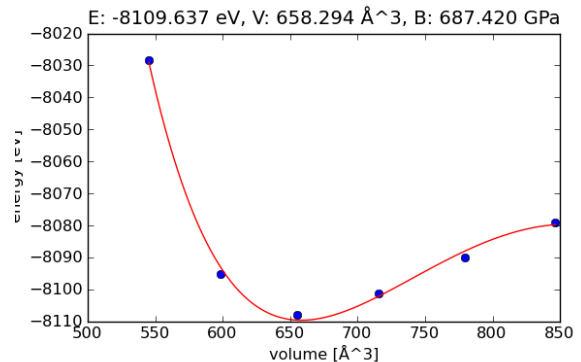
Примесь V в нитрид титана



Модуль упругости – **774 ГПа**

в)

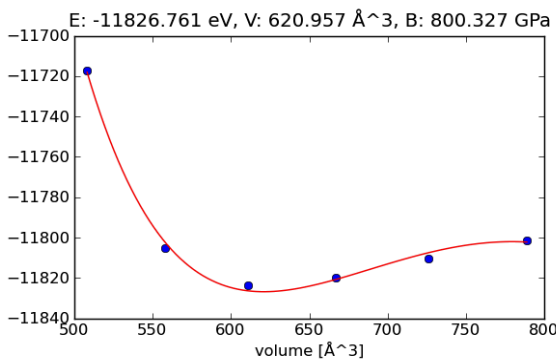
Примесь V в карбид титана



Модуль упругости – **687 ГПа**

г)

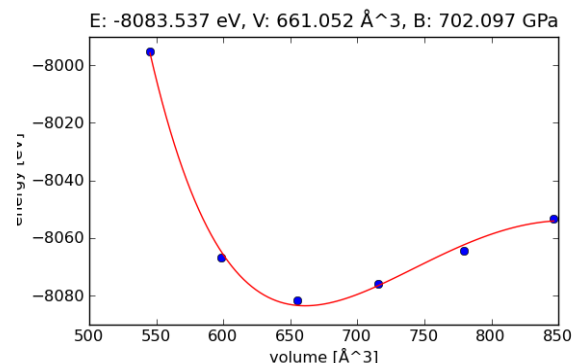
Примесь Ta в нитрид титана



Модуль упругости – **800 ГПа**

д)

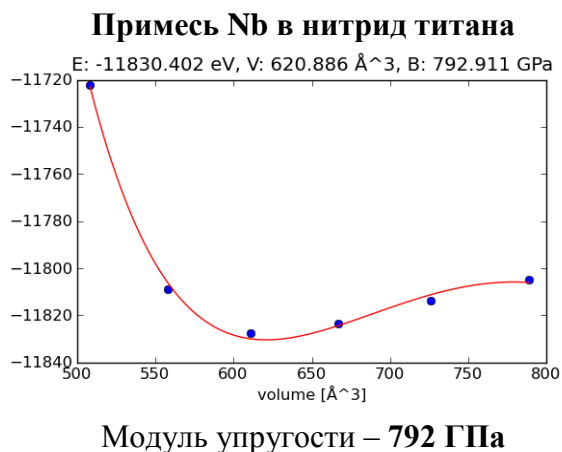
Примесь Ta в карбид титана



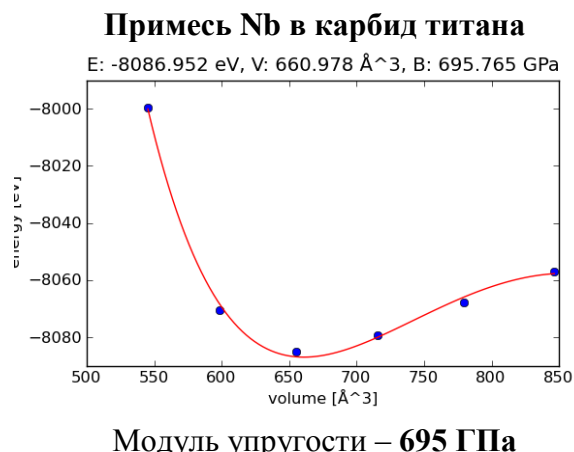
Модуль упругости – **702 ГПа**

е)

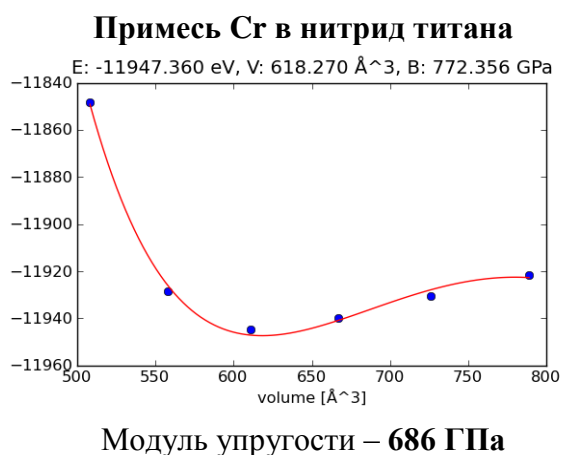
Рис. 2. Построение энергетических зависимостей суперячеек нитрида и карбида титана для нахождения модуля упругости по методу Бирч-Мурнагана (примеси Zr, V, Ta)



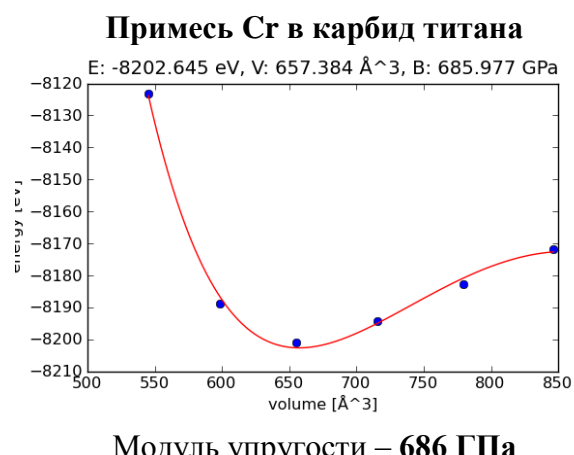
a)



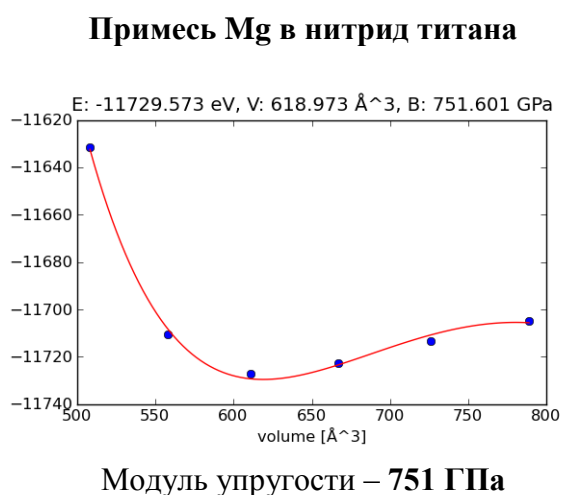
б)



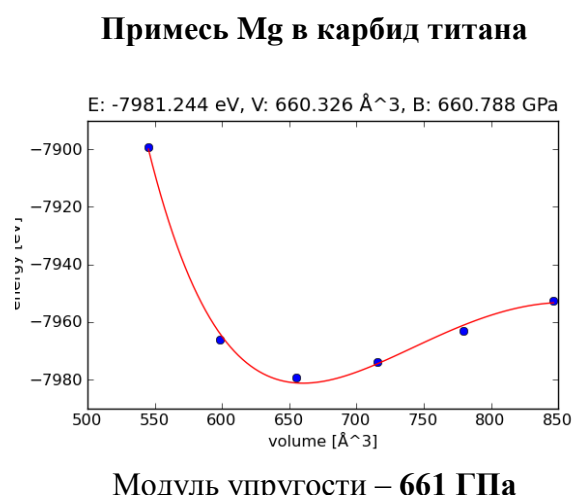
в)



г)



д)



е)

Рис. 3. Построение энергетических зависимостей суперячеек объемного нитрида (слева) и карбида титана (справа) для нахождения модуля упругости по методу Бирч-Мурнагана (примеси Nb, Cr, Ta, V)

Математическое моделирование упрочнения примесями переходных металлов показало достаточно высокую эффективность, в особенности танталом Ta (прочность возросла на

29% для TiN и на 42% для TiC) и ниобием Nb (прочность возросла на 28% для TiN и на 41% для TiC).

Библиографический список

1. **Jelinek, B. S. Groh, Horstemeyer, M. F.** MEAM potentials for Al, Si, Mg, Cu, and Fe alloys. [Электронный ресурс] http://www.hpc.msstate.edu/publications/docs/2011/06/9102Baske_s_NIST_2011.pdf
2. Quantum Espresso. [Электронный ресурс] www.quantum-espresso.org
3. Abinit. [Электронный ресурс] www.abinit.org
4. **Monkhorst H.J., Pack, J. D.** // Phys. Rev. B 13. 5188. 1976.
5. **Birch F., Geophys J.** // Res. 83. 1257. 1978.
6. <http://www.csc.fi/blogit/atcsc-arkisto/2008/4/general-purpose-gpu-2013-the-next-revolution-in-scientific-computing>.

Дата поступления
в редакцию 09.12.2013

A.M. Kuzmishina¹, O.V. Kretinin¹, E.E. Vlasov¹, S.V. Sery²

STUDY ON PROPERTIES OF BINARY INTERMETALLICS «FROM FIRST PRINCIPLES» BASED ON QUANTUM-MECHANICAL CALCULATIONS USING CUDA

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Komsomolsk-on-Amur state technical university²

Purpose: Develop an effective and fast way of mathematical modeling of nanostructures "from first principles" and their properties.

Methodology: Calculation of stable binary compounds by quantum mechanical calculations using CUDA technology.

Findings: The estimation of increasing the coefficient of performance for GPU-computing method based on CUDA-technology. It is shown that the use of CUDA technology can significantly reduce the performance of computing.

Key words: intermetallics, quantum-mechanical calculations, CUDA technology.

УДК 621.9

В.В. Крайнов¹, М.В. Пономарёв¹, И.Н. Фролова²

АНАЛИЗ ФОРМАТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ STEP

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО ПКО «Теплообменник»²

Предлагается метод автоматического формирования базовой структуры технологического процесса, в основе которого лежит метод синтеза, при этом исходные данные для формирования структуры могут быть автоматически получены с 3-D модели изделия. Проанализированы способы получения исходных данных с модели детали. Изложены основные результаты анализа форматов STEP, полученных из разных систем моделирования деталей. Показана возможность формирования исходных данных для разработки технологического процесса по форме и параметрам детали в автоматическом режиме.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, технологический процесс, механическая обработка, метод синтеза, EXPRESS/STEP технологии, формат STEP.

Современные условия жесткой конкуренции вынуждают производителей оптимизировать свои производства, вводить всё новые способы экономии материальных и временных ресурсов с целью понижения себестоимости изделий и повышения их ценовой привлекательности для потребителя. При этом потребитель не желает довольствоваться только дешевой продукцией, предъявляя жесткие требования к его качеству.

Качество продукции и производительность производства – два основных критерия выживаемости предприятия в условиях конкурентной борьбы. Глобальная компьютеризация и автоматизация производства – это важнейший шаг к повышению качества и увеличению объемов выпускаемой продукции.

Как известно, прежде чем создать какое-либо изделие, необходимо продумать его идею, конструкцию, технологию изготовления и только затем пускать в производство. Конструкторская и технологическая подготовка требуют много временных и материальных ресурсов, что существенно сказывается на цене готовой продукции. Да и человеческие ошибки и просчеты при конструировании и разработке технологий никто не может исключить, что отражается на качестве и надежности продукта.

Но если с автоматизацией работы конструктора дела идут довольно хорошо: существует огромное множество САД-систем, предлагающих широкие возможности облегчения конструкторского труда, кооперативной работы, инженерных расчетов и представляющих обширные библиотеки стандартных изделий, что нельзя сказать об автоматизации создания технологических процессов и проектирования технологической оснастки.

Разработка техпроцесса – это довольно трудоёмкий процесс, требующий учёта и анализа многих факторов. Существующие системы автоматизации проектирования технологических процессов, или САПР ТП, существенно облегчили и ускорили работу технолога, однако они имеют недостатки и практически исчерпали свой потенциал роста. В их основе лежат такие методы проектирования, как индивидуальный, проектирование на основе группового техпроцесса и проектирование методом синтеза.

При индивидуальном методе технолог в ручном режиме компоует операции и переходы, используя имеющуюся в САПР ТП базу данных, в которой содержатся списки наименований операций, переходов, перечни оборудования, оснастки и инструмента. Имеется также возможность проектировать техпроцесс на основе процесса-аналога, однако сложность такого метода – именно в подборе детали-аналога.

Проектирование на основе группового техпроцесса требует предварительного группирования деталей в группу и разработки группового техпроцесса.

Метод синтеза заключается в алгоритмическом формировании техпроцесса на основе геометрического и технологического описания детали. В данный момент этот метод развит плохо из-за отсутствия строгого математического описания формирования структуры техпроцесса на основе геометрии и технологических атрибутов. Однако он имеет наибольший потенциал для создания на его основе системы автоматизированного проектирования техпроцесса.

Проанализировав существующие САПР ТП, можно сделать вывод об их основных недостатках: невозможность автоматического формирования структуры или его части на основе геометрии детали, получаемой с 3-D модели; слабая интеграция в единое информационное пространство предприятия; отсутствие связи структуры техпроцесса с параметрами чертежа; отсутствие автоматического ввода исходных данных об изделии; нет автоматического формирования технологических эскизов.

Оценив существующие разработки и их недостатки, предлагается метод автоматического формирования базовой структуры техпроцесса, в основе которого лежит метод синтеза, при этом исходные данные для формирования структуры будут автоматически получены с 3-D модели изделия. Сейчас разрабатываются алгоритмы, описывающие эту структуру, используя геометрическое описание детали. А дальнейшее развитие САД-систем позволит присваивать поверхностям трёхмерной модели технологические параметры, которые могут быть считаны и использованы при автоматическом формировании техпроцесса. Ассоциативная связь структуры техпроцесса и 3-D модели даёт недостающую современным системам гибкость.

Для реализации идеи автоматического формирования техпроцесса в виде формализованного описания операций по геометрической модели детали необходимо разработать общие правила моделирования, которые связаны определением последовательности обработки поверхностей и назначением баз. Разделение поверхностей на обрабатываемые и базовые происходит по заранее сформированным матрицам и спискам поверхностей, получаемых при анализе геометрической модели детали.

Для начала процесса автоматического проектирования системе необходимо получить исходные данные для работы, т.е. геометрическое описание и технологические атрибуты. Взять необходимую нам информацию с 3-D модели можно следующими способами:

- приложения на основе инструментов и библиотек ActiveX;
- технология OLE for Design and Modelling;
- EXPRESS/STEP технологии.

Критериями, по которым можно оценить возможность применения того или иного способа, являются универсальность, простота обработки данных, распространённость, двусторонняя ассоциативность, т.е. возможность редактировать файл, содержащий данные о 3-D модели, с последующим её изменением.

Технологии ActiveX обладают широким спектром возможностей: обеспечивают бесфайловый обмен; возможность создания ассоциативного модуля; возможность использовать всю информацию, которую разработчики внедрили в САД-систему. Однако недостаток данного способа – его неуниверсальность, привязанность к конкретной САПР и трудности с разработкой ПО.

Технология OLE for Design and Modelling предоставляет собой распределённую модель, когда между САД-, САМ и САЕ- системами предлагается ряд стандартных интерфейсов для обмена и управления данными. Эта технология позволяет одной системе получить бесфайловый доступ к данным другой системы. Также данная технология обеспечивает ассоциативность и гибкость при работе с 3-D моделями. Однако применимость данного метода ограничена приложениями, поддерживающими технологию.

EXPRESS/STEP технологии основаны на совокупности форматов описания данных Express/STEP, созданных согласно стандартам группы ISO 10303. STEP – формат представления данных в текстовом виде согласно Express-схеме. Данная технология нацелена в

первую очередь на описание и передачу данных. Все ведущие разработчики САПР как в России, так и за рубежом внедрили в свои системы возможность экспорта данных в формат STEP. Текстовый файл формата содержит структурированное описание топологии поверхностей геометрической модели, а также некоторые другие атрибуты, в частности, технологические параметры.

Таким образом, данный метод является наиболее простым в интерпретации данных, универсальным в связи со своей широкой распространённостью и подходит для автоматизации процесса составления технологических эскизов, так как имеет двустороннюю ассоциативность. К недостаткам можно лишь отнести возможную потерю данных при переносе в данный формат, однако непрекращающиеся работы над его усовершенствованием и поддержка Международной организации по стандартизации даёт уверенность в минимизации подобных ошибок в будущем. Кроме этого, формат STEP имеет широкие возможности по дополнению передаваемых форматом данных. Именно поэтому в качестве технологии получения и хранения информации была выбрана технология Express/STEP.

Для использования информации о детали, которая на физическом уровне хранится в формате STEP, необходимы метаданные о формате, т.е. описание его структуры и внутренних связей данных. Необходимые метаданные содержатся в стандарте ISO 10303.

Файл формата STEP имеет следующую организацию: начинается со строки ISO-10303-21 и заканчивается строкой END-ISO-10303-21. Между этими записями заключено тело формата. Первая, заголовочная, часть файла открывается записью HEAD» и заканчивается «ENDSE». Здесь приводится информация об имени файла, месте его расположения, дате и времени создания, авторе, организации, названии и версии STEP-конвертора и т.д. Эта часть файла не представляет для наших целей особого интереса.

После заголовочной секции идёт секция данных. Она открывается записью DATA. В этой секции строки начинаются символом # и порядковым номером. Это т.н. указатели. С помощью них происходит отсылка к нужной строке (указатели также называют идентификаторами экземпляра сущности). После указателя следует служебное (ключевое) слово (тип сущности). В скобках указаны значения атрибутов. Признаком конца одной логической записи является точка с запятой (одна логическая запись соответствует одному экземпляру сущности). Логическая запись может посредством указателей ссылаться на одну или несколько других.

Первой строкой, значимой для нас, является строка с записью MANIFOLD_SOLID_BREP. Она содержит ссылки на твёрдые тела в сборке. Запись #1=MANIFOLD_SOLID_BREP("#2); содержит указатель (#1 – номер строки с текущей записью), символ присваивания «(=)» указателю некоторого значения, ключевые слова MANIFOLD_SOLID_BREP, указывающие на тип сущности и атрибуты сущности в скобках ("#2). Как видно из этой строки, в сборке содержится одно твёрдое тело, а дальнейшее описание его передается через указатель строке #2.

Строка #2 содержит следующую сущность: CLOSED_SHELL. Она указывает поверхности (буквально «замкнутые оболочки»), ссылаясь на определяющие их строки. Переходя по ссылкам, мы найдём описание поверхностей. Пример: CLOSED_SHELL("(#3,#23,#51)), где даны ссылки на описание трёх поверхностей детали.

Следуя по одной из ссылок, например #3, попадаем на следующую запись #3=ADVANCED_FACE("(#9),#4,.F.). Сущность ADVANCED_FACE определяет поверхность твёрдого тела. Она имеет три атрибута, один из которых логический.

#4=PLANE("#5); - сущность PLANE указывает на то, что поверхность плоская. Цилиндрические поверхности будут соответствовать сущности CYLINDRICAL_SURFACE, конические поверхности - CONICAL_SURFACE.

В этом месте необходимо заметить, что на данный момент существуют трудности с интерпретацией логического атрибута сущности ADVANCED_FACE. В работе [1] автор указывает, что данный атрибут определяет тип поверхности: F (FALSE) – простая, T (TRUE) –

сложная. Исходя из этого делается вывод, что атрибут F соответствует плоской поверхности, а T – неплюской. Такое заключение сделано на основе исследования структуры файла STEP, который был создан в CAD-системе T-flex на основе 3-D модели относительно простой по геометрии детали, содержащей пять поверхностей. Однако, проведя исследования файлов формата STEP, полученных в других средах моделирования, в частности Kompas, Solid Edge и Unigraphics, было выявлено несоответствие типа поверхности и значения логического атрибута сущности ADVANCED_FACE. На рис. 1 показана часть файла STEP, созданного средствами системы Unigraphics.

```
#93=MANIFOLD_SOLID_BREP("1",#94);
#94=CLOSED_SHELL(",(#100,#101,#102,#103,#104,#105,#106,#107));
#95=CONICAL_SURFACE(",#190,28.6213394580209,19.9999999999999);
#96=CYLINDRICAL_SURFACE(",#188,45.);
#97=CYLINDRICAL_SURFACE(",#192,28.6213394580209);
#98=CYLINDRICAL_SURFACE(",#196,10.);
#99=CYLINDRICAL_SURFACE(",#199,25.);
#100=ADVANCED_FACE(",(#111,#112),#108,.F.);
#101=ADVANCED_FACE(",(#113,#114),#96,.T.);
#102=ADVANCED_FACE(",(#115,#116),#95,.T.);
#103=ADVANCED_FACE(",(#117,#118),#97,.T.);
#104=ADVANCED_FACE(",(#119,#120),#109,.F.);
#105=ADVANCED_FACE(",(#121,#122),#98,.F.);
#106=ADVANCED_FACE(",(#123,#124),#110,.F.);
#107=ADVANCED_FACE(",(#125,#126),#99,.F.);
#108=PLANE(",#186);
#109=PLANE(",#194);
#110=PLANE(",#198);
```

Рис. 1. Фрагмент файла STEP в системе Unigraphics

Этот файл создан из 3D-модели детали, имеющей три плоские, четыре цилиндрические и одну коническую поверхность. Следуя тексту работы [1], все сущности, имеющие логический атрибут F, должны определять простые плоские поверхности, а имеющие атрибут T – сложные поверхности, цилиндрические либо конические. Однако строка #107=ADVANCED_FACE(",(#125,#126),#99,.F.), ссылается через указатель #99 на строку #99=CYLINDRICAL_SURFACE(",#199,25.). Таким образом, получается, что поверхность с логическим атрибутом F определена как цилиндрическая. То же самое можно заметить и в строке #106. Следовательно, нельзя опираться в определении типа поверхности на логический атрибут сущности ADVANCED_FACE, но для этих целей нужно использовать указатель на тип поверхности, который является атрибутом ADVANCED_FACE, как, например, в строке #107=ADVANCED_FACE(",(#125,#126),#99,.F.) ссылкой на тип поверхности будет указатель #99. Сущность CYLINDRICAL_SURFACE(",#199,25.) в качестве атрибута имеет радиус поверхности, т.е. R = 25 мм. CONICAL_SURFACE (",#190, 28.6213394580209,

19.9999999999999) определяется радиусом конической поверхности в начальной точке и половиной угла косинуса в радианах. Указатели #199 и #190 ссылаются на AXIS2_PLACEMENT_3D, которая определяет начало собственной системы координат поверхности относительно глобальной компоненты вектора нормали к плоскости, компоненты вектора плоскости.

После определения вида поверхности необходимо определить её границы. Ссылка на идентификатор границы также является атрибутом ADVANCED_FACE, так в примере на рис. 1 в строке #100=ADVANCED_FACE(",(#111,#112),#108,.F.) указатели #111 и #112 ссылаются на сущности FACE_BOUND (границы поверхности). Эта сущность также имеет в своих атрибутах идентификаторы-указатели на объекты ниже по иерархической ступени: ссылки на рёбра, заключающие поверхности, далее на декартовы координаты вершин этих рёбер.

Следует отметить различия в определении сущностей, которые были обнаружены во время исследования файлов STEP, созданных разными трансляторами. Так, сущность FACE_BOUND, отвечающая за границы поверхности, в системе Unigraphics, именуется как FACE_OUTER_BOUND в системах T-flex, Solid Edge и Kompas 3D. Структура файлов тоже имеет различия.

На рис. 2 представлен фрагмент файла STEP, созданный в Solid Edge. 3-D модель в его основе аналогична модели для файла с рис 1.

```
#32 = ADVANCED_FACE(", (#65, #66), #67, .T.);
#34 = ADVANCED_FACE(", (#69, #70), #71, .F.);
#36 = ADVANCED_FACE(", (#73, #74), #75, .F.);
#38 = ADVANCED_FACE(", (#77, #78), #79, .T.);
#40 = ADVANCED_FACE(", (#81, #82), #83, .F.);
#42 = ADVANCED_FACE(", (#85, #86), #87, .F.);
#44 = ADVANCED_FACE(", (#89, #90), #91, .T.);
#46 = ADVANCED_FACE(", (#93, #94), #95, .F.);
#49 = MANIFOLD_SOLID_BREP('1', #98);
#67 = CONICAL_SURFACE(", #106, 28.6213394580209, 0.349065850398865);
#71 = CYLINDRICAL_SURFACE(", #110, 25.0000000000000);
#75 = PLANE(", #114);
#79 = CYLINDRICAL_SURFACE(", #118, 45.0000000000000);
#83 = PLANE(", #122);
#87 = CYLINDRICAL_SURFACE(", #126, 10.0000000000000);
#91 = CYLINDRICAL_SURFACE(", #130, 28.6213394580209);
#95 = PLANE(", #134);
#98 = CLOSED_SHELL(", (#40, #38, #32, #44, #46, #42, #36, #34));
...
```

Рис. 2. Фрагмент файла STEP в системе Solid Edge

Однако разница заметна невооружённым глазом.

Но, несмотря на различия в размещении строк друг относительно друга, внутри текстового файла логика связей и ключевые слова для обозначения сущностей, а также определяющие их атрибуты идентичны во всех исследованных системах. Используя идентификаторы-указатели, составляется алгоритм по вычленению необходимых данных из текста формата. Реализация этого алгоритма в виде программного обеспечения планируется на языке Python, обладающем требуемой функциональностью, гибкостью и простотой освоения. Кроме того, Python имеет хорошую совместимость с языками C и C++, что облегчает его взаимодействие со всеми Windows-приложениями.

На основе данных, взятых из формата STEP, можно в автоматическом режиме формировать матрицы. Результатом построения каждой матрицы является список поверхностей и геометрических элементов детали с соответствующими характеристиками. Если все результаты, полученные в матрицах, свести воедино, то получим спецификацию поверхностей и геометрических элементов детали. Она содержит все необходимые данные для дальнейшего процесса проектирования.

Таким образом, имея в наличии 3-D модель изделия и файл в формате STEP, содержащий информацию о нём, мы можем, используя алгоритмы и правила, автоматически сформировать базовую структуру техпроцесса, значительно сэкономив время технолога и удешевив процесс производства изделия.

-
1. Автоматизированное создание структуры технологического процесса: монография / И.Н. Фролова [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 183 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

V.V. Kraynov¹, M.V. Ponomarev¹, I.N. Frolova²

ANALYSIS FORMAT DATA STEP

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC PDC «Теплообменик»²

Purpose: Identify the main ideas of the method automate the design process of mechanical treatment on the basis of the formation of the basic structures, describe the sequence of actions, features and difficulties arising in this case. Learn the basic structure and features of the data format STEP.

Methodology: Comparison and identification features, advantages and disadvantages of existing technologies to automate the creation of technical processes. Studying the structure of the data format STEP by successive complications 3Dmodeli and reveal patterns of change in the structure of the file format STEP.

Findings: The basic idea of the method of design automation of technological processes of mechanical treatment on the basis of the formation of the basic structures are described especially the sequence of actions and difficulties arising in this case. The features of the popular STEP data format and the differences in the structure of the format created by different development environments.

Key words: design automation, process, mechanical processing, synthesis method, EXPRESS / STEP technology format STEP.

УДК 531.395

Д.А. Смирнов

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУЛИСНОГО МЕХАНИЗМА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Получены аналитические выражения для определения кинематических характеристик кулисного механизма. В качестве параметров в этих выражениях используются длины звеньев, а также координаты кинематических пар механизма. Представлены зависимости углов поворота кривошипа и кулисы от времени, а также их угловых скоростей и угловых ускорений. Определены выражения для скорости и ускорения кулисного камня, их проекций на оси координат. Приведены результаты решения для частной задачи и представлены графики зависимостей кинематических характеристик от времени.

Ключевые слова: кулисный механизм, кинематический анализ механизмов, кинематические зависимости.

В современных машинах применяется большое количество механизмов, которые могут быть приведены к кинематической схеме кулисного механизма [2, 4, 6]. В частности, к ним можно отнести механизмы с гидро- или пневмоцилиндрами, широко применяемые в грузоподъемных и других машинах. Кинематический анализ механизмов является первым этапом и необходимой предпосылкой расчета динамики машин [6].

В теории механизмов и машин используется несколько методов кинематического анализа. Наибольшее распространение получили метод векторных контуров, разработанный В.А. Зиновьевым [3], метод преобразования координат, развитый в работах Г.Ф. Морошкина [5], а также графические методы кинематического анализа плоских механизмов [2, 4, 6]. Графические методы в настоящее время имеют вспомогательное значение как средство для определения начальных положений звеньев или для контроля правильности вычислений [4]. Развитие аналитических методов кинематического анализа – актуальная задача в связи с совершенствованием современных средств автоматизированного анализа.

Целью данного исследования является определение закона движения точки A в координатной форме, зависимостей ее скорости и ускорения от времени, а также зависимостей углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев для кулисного механизма, кинематическая схема которого представлена на рис. 1.

В большинстве механизмов с гидро- и пневмоцилиндрами движение осуществляется за счет изменения расстояния S между точками A и O_2 . Поэтому задача сводится к определению углов поворота кривошипа φ_1 и кулисы φ_2 как функции расстояния S .

Обозначим x_1, y_1 и x_2, y_2 координаты кинематических пар O_1 и O_2 соответственно, а l_1 длину кривошипа OA . Выражая координаты точки A , получим

$$x_A = x_1 + l_1 \cos \varphi_1 = x_2 + S \cos \varphi_2, \quad (1)$$

$$y_A = y_1 + l_1 \sin \varphi_1 = y_2 + S \sin \varphi_2. \quad (2)$$

Преобразуем эти уравнения:

$$\cos \varphi_2 = a_1 + b_1 \cos \varphi_1, \quad (3)$$

$$\sin \varphi_2 = a_2 + b_1 \sin \varphi_1, \quad (4)$$

где

$$a_1 = \frac{x_1 - x_2}{S}, \quad a_2 = \frac{y_1 - y_2}{S}, \quad b_1 = \frac{l_1}{S}. \quad (5)$$

Возведем в квадрат, правые и левые части уравнений (3) и (4), и, сложив их, получим уравнение относительно угла φ_1

$$a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_1 = c_1, \quad (6)$$

где

$$c_1 = \frac{1 - a_1^2 - a_2^2 - b_1^2}{2b_1}. \quad (7)$$

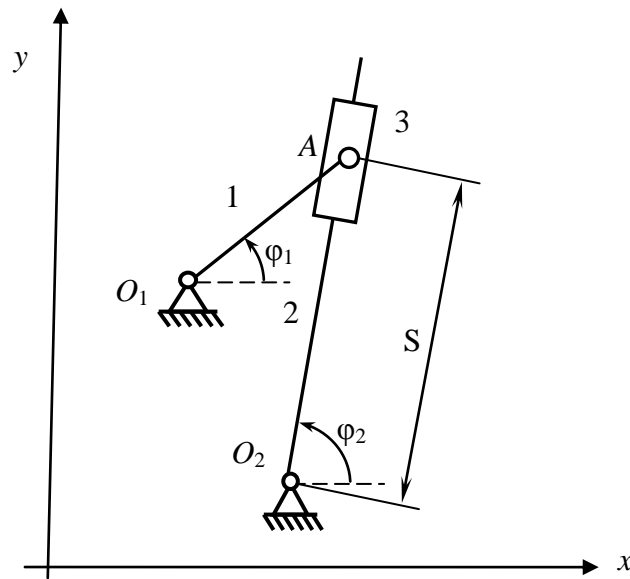


Рис. 1. Кинематическая схема механизма:
1 – кривошип; 2 – кулиса; 3 – кулисный камень

Уравнение (6) решается с помощью введения вспомогательного аргумента [1]. Разделим левую и правую часть уравнения на $\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ и введем в рассмотрение угол β таким образом, чтобы выполнялись условия

$$\sin \beta = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}, \quad \cos \beta = \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}.$$

При этом угол β может быть выражен по одной из двух формул:

$$\beta = \arcsin \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}, \quad \beta = \arccos \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}. \quad (8)$$

Уравнение (6) принимает вид $\sin(\varphi_1 + \beta) = \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}$.

Выражая φ_1 и учитывая (8), получим

$$\varphi_1 = -\arcsin \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} + (-1)^k \arcsin \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} + \pi k, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

Принимая $k = 0$, получим выражение для φ_1

$$\varphi_1 = -\arcsin \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} + \arcsin \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}.$$

Подставляя в полученное выражение зависимости (5) и (7), окончательно для φ_1 получим

$$\varphi_1 = -\arcsin \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} + \arcsin \frac{S^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - l_1^2}{2l_1 \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}. \quad (9)$$

Это выражение представляет зависимость угла поворота кривошипа φ_1 в виде функции расстояния S и координат кинематических пар O_1 и O_2 .

Для определения угловой скорости кривошипа ω_1 и углового ускорения ε_1 необходи-

мо задать зависимости $x_1 = x_1(t)$, $x_2 = x_2(t)$, $y_1 = y_1(t)$, $y_2 = y_2(t)$, $S = S(t)$, подставить их в выражение (9) и продифференцировать по времени:

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt}, \quad \varepsilon_1 = \frac{d^2\varphi_1}{dt^2}.$$

Рассмотрим решение этой задачи в частном случае, когда кинематические пары O_1 и O_2 неподвижны. Тогда расстояние между кинематическими парами определится выражением

$$O_1O_2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = \text{const}. \quad (10)$$

Подставляя эту зависимость в соотношение (9), получим

$$\varphi_1 = -\arcsin \frac{x_1 - x_2}{O_1O_2} + \arcsin \frac{S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2)}{2l_1O_1O_2}. \quad (11)$$

Определим выражения для угловой скорости ω_1 и углового ускорения ε_1 кривошипа в рассматриваемом частном случае

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{2S}{\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}} \frac{dS}{dt},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = A_1 \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 + B_1 \frac{d^2S}{dt^2},$$

где A_1 и B_1 определяются выражениями

$$A_1 = \frac{2 \left[\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2} + \frac{4S^2(S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))}{\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}} \right]}{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}, \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{2S}{\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}}. \quad (13)$$

Закон движения точки A в координатной форме имеет следующий вид:

$$x_A = l_1 \cos \varphi_1 = l_1 \cos \left(-\arcsin \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} + \arcsin \frac{S^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - l_1^2}{2l_1 \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right), \quad (14)$$

$$y_A = l_1 \sin \varphi_1 = l_1 \sin \left(-\arcsin \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} + \arcsin \frac{S^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - l_1^2}{2l_1 \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right). \quad (15)$$

Для частного случая, когда кинематические пары O_1 и O_2 неподвижны, уравнения (14) и (15) принимают вид

$$x_A = l_1 \cos \varphi_1 = l_1 \cos \left(-\arcsin \frac{x_1 - x_2}{O_1O_2} + \arcsin \frac{S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2)}{2l_1O_1O_2} \right),$$

$$y_A = l_1 \sin \varphi_1 = l_1 \sin \left(-\arcsin \frac{x_1 - x_2}{O_1O_2} + \arcsin \frac{S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2)}{2l_1O_1O_2} \right).$$

Скорость точки A , а также ее проекции на оси координат определяются следующими выражениями:

$$V_A = \omega_1 l_1 = \frac{2Sl_1}{\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}} \frac{dS}{dt},$$

$$V_{Ax} = -V_A \sin \varphi_1 = \frac{2Sl_1 \sin \varphi_1}{\sqrt{4l_1^2O_1O_2^2 - (S^2 - (O_1O_2^2 + l_1^2))^2}} \frac{dS}{dt},$$

$$V_{Ay} = V_A \cos \varphi_1 = \frac{2Sl_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{4l_1^2 O_1 O_2^2 - (S^2 - (O_1 O_2^2 + l_1^2))^2}} \frac{dS}{dt},$$

где φ_1 определяется по формуле (11)

Ускорение точки A , а также его проекции на оси координат определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \vec{a}_A &= \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^\tau, & a_A &= \sqrt{(a_A^n)^2 + (a_A^\tau)^2}, \\ a_{Ax} &= a_{Ax}^n + a_{Ax}^\tau, & a_{Ay} &= a_{Ay}^n + a_{Ay}^\tau. \end{aligned}$$

где $a_A^n, a_A^\tau, a_{Ax}^n, a_{Ax}^\tau, a_{Ay}^n, a_{Ay}^\tau$ – нормальное и касательное ускорение точки A , а также их проекции на оси координат, которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_A^n &= \omega_1^2 l_1 = \frac{4S^2 l_1}{4l_1^2 O_1 O_2^2 - (S^2 - (O_1 O_2^2 + l_1^2))^2} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2, \\ a_{Ax}^n &= -a_A^n \cos \varphi_1 = -\frac{4S^2 l_1 \cos \varphi_1}{4l_1^2 O_1 O_2^2 - (S^2 - (O_1 O_2^2 + l_1^2))^2} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2, \\ a_{Ay}^n &= -a_A^n \sin \varphi_1 = -\frac{4S^2 l_1 \sin \varphi_1}{4l_1^2 O_1 O_2^2 - (S^2 - (O_1 O_2^2 + l_1^2))^2} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2, \\ a_A^\tau &= \varepsilon_1 l_1 = \left(A_1 \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 + B_1 \frac{d^2 S}{dt^2} \right) l_1, \\ a_{Ax}^\tau &= -a_A^\tau \sin \varphi_1 = -\left(A_1 \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 + B_1 \frac{d^2 S}{dt^2} \right) l_1 \sin \varphi_1, \\ a_{Ay}^\tau &= a_A^\tau \cos \varphi_1 = \left(A_1 \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 + B_1 \frac{d^2 S}{dt^2} \right) l_1 \cos \varphi_1, \end{aligned}$$

где A_1 и B_1 определяются по (12) и (13).

Определим зависимость угла поворота кулисы φ_2 в виде функции расстояния S . Из уравнений (1) и (2) получим

$$\cos \varphi_1 = a_3 + b_2 \cos \varphi_2, \tag{16}$$

$$\sin \varphi_1 = a_4 + b_2 \sin \varphi_2, \tag{17}$$

где

$$a_3 = \frac{x_2 - x_1}{l_1}, \quad a_4 = \frac{y_1 - y_2}{l_1}, \quad b_2 = \frac{S}{l_1}. \tag{18}$$

Исключая угол φ_1 из системы уравнений (16) и (17), получим

$$a_3 \cos \varphi_2 + a_4 \sin \varphi_2 = c_2, \tag{19}$$

где

$$c_2 = \frac{1 - a_3^2 - a_4^2 - b_2^2}{2b_2}. \tag{20}$$

Решая уравнение (19) аналогично решению уравнения (6), получим

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{a_3}{\sqrt{a_3^2 + a_4^2}} - \arcsin \frac{c_2}{\sqrt{a_3^2 + a_4^2}}.$$

Подставляя в это выражение зависимости (18) и (20), получим

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - \arcsin \frac{l_1^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - S^2}{2S\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}.$$

Это выражение представляет зависимость угла поворота кулисы φ_2 в виде функции расстояния S и координат кинематических пар O_1 и O_2 .

Для определения угловой скорости кулисы ω_2 и углового ускорения ε_2 необходимо задать зависимости $x_1 = x_1(t)$, $x_2 = x_2(t)$, $y_1 = y_1(t)$, $y_2 = y_2(t)$, $S = S(t)$, подставить их в выражение (10) и продифференцировать по времени:

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt}, \quad \varepsilon_2 = \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}.$$

Рассмотрим решение этой задачи в частном случае, когда кинематические пары O_1 и O_2 неподвижны. Тогда расстояние между кинематическими парами определится выражением (11). Подставляя эту зависимость в соотношение (10), получим

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{x_2 - x_1}{O_1O_2} - \arcsin \frac{l_1^2 - O_1O_2^2 - S^2}{2SO_1O_2}.$$

Определим выражения для угловой скорости ω_2 и углового ускорения ε_2 кулисы в рассматриваемом частном случае:

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{l_1^2 - O_1O_2^2 + S^2}{S\sqrt{4S^2O_1O_2^2 - (C - S^2)^2}} \frac{dS}{dt},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = A_2 \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 + B_2 \frac{d^2S}{dt^2},$$

где A_2 , B_2 и C определяются выражениями:

$$A_2 = \frac{2\sqrt{4S^4O_1O_2^2 - S^2(C - S^2)^2} + (C + S^2) \frac{16S^2O_1O_2^2 - 2(C - S^2) - 4S^2(C - S^2)}{\sqrt{4S^4O_1O_2^2 - S^2(C - S^2)^2}}}{4S^3O_1O_2^2 - S(C - S^2)^2},$$

$$B_2 = \frac{l_1^2 - O_1O_2^2 + S^2}{S\sqrt{4S^2O_1O_2^2 - (C - S^2)^2}},$$

$$C = l_1^2 - O_1O_2^2.$$

На рис. 2 – рис. 4 представлены зависимости кинематических характеристик звеньев механизма от времени. Задача решена при следующих исходных данных:

$$x_1 = 0, \quad y_1 = 0, \quad x_2 = 5 \text{ м}, \quad y_2 = -2 \text{ м}.$$

При этом закон относительного движения кулисного камня принят равномерным:

$$S = S_0 + Vt,$$

где $S_0 = 3,73$ м – расстояние между точками A и O_2 в начальный момент времени; $V = 1$ м/с – скорость скольжения кулисного камня по отношению к кулисе (относительная скорость).

Полученные зависимости позволяют определять кинематические характеристики звеньев механизма (углы поворота, угловые скорости и угловые ускорения) в произвольный момент времени, а также определять скорости и ускорения точек звеньев механизма. При этом должны быть известны длина кривошипа, координаты кинематических пар O_1 и O_2 , а также задан закон относительного движения кулисного камня S .

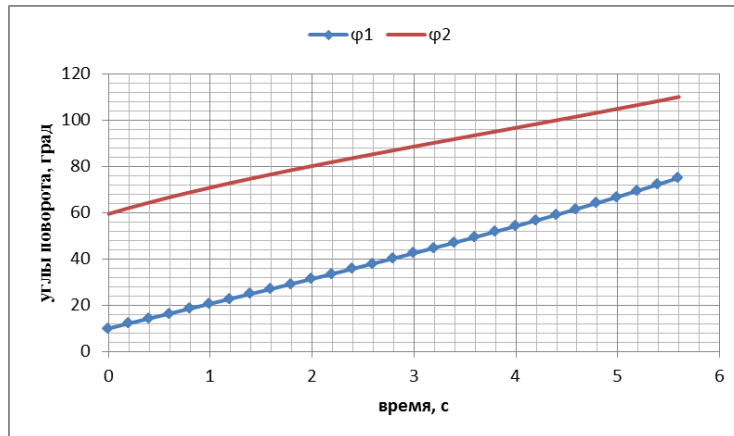


Рис. 2. Зависимости углов поворота от времени

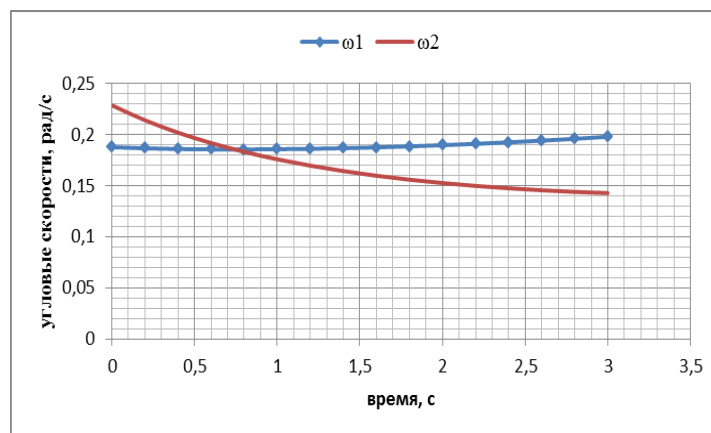


Рис. 3. Зависимости угловых скоростей от времени

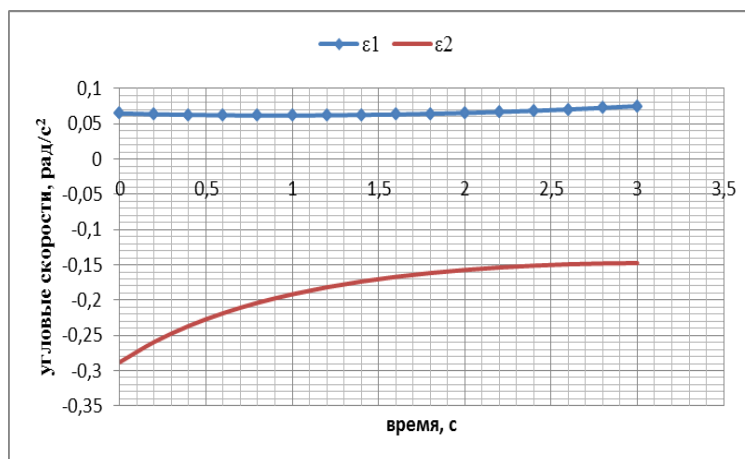


Рис. 4. Зависимости угловых ускорений от времени

Библиографический список

1. Тригонометрические уравнения: учеб. пособие / А.И. Азаров [и др.]. – Мн.: ООО «Тривиум», 1994. – 160 с.
2. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
3. Зиновьев, В.А. Теория механизмов и машин / В.А. Зиновьев – М.: Машгиз., 1959. – 144 с.

4. Левитская, О.Н. Курс теории механизмов и машин: учеб. пособие для мех. спец. вузов / О.Н. Левитская, Н.И. Левитский – М.: Высш. шк., 1985. – 279 с.
5. Морошкин, Г.Ф. Уравнения динамики простых систем с интегрируемыми связями / Г.Ф. Морошкин – М.: Наука, 1981. – 116 с.
6. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование: учеб. пособие / Г.А. Тимофеев [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 169 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

D.A. Smirnov

ANALYSIS OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF ROCKER MECHANISM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Conclusion analytical dependencies for the kinematic characteristics of rocker mechanism.

Design/methodology/approach: For the determination of the time dependences for the rotation angle, angular velocity and angular acceleration links rocker mechanism, used methods of theoretical mechanics and mathematical analysis.

Findings: Defined time dependence of the rotation angle, angular velocity and angular accelerations and velocities and accelerations of the kinematic pairs rocker mechanism. Conducted the decision of the specific problem and presents the graphs of functional time dependences of the kinematic characteristics of the links in the mechanism.

Originality/value: The results may be used for creation of automated methods for kinematic analysis rocker mechanisms. The obtained dependences can find the rotation angle, angular velocity, angular acceleration and velocity and acceleration of kinematic pairs mechanism at a time. The obtained dependencies for the kinematic characteristics of the mechanism may also be used for forces analysis of the mechanism.

Key words: the rocker mechanism, the kinematic analysis of mechanisms, the dependence of the kinematic.

УДК 621.791.763

С.Ю. Смоленский, А.С. Павлов

РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА ПЕТЕЛЬ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены основные результаты исследования возможности изготовления петель свертных контактной рельефной сваркой с использованием универсальных точечных машин. Приведены данные по технологии сварки, сварочной оснастке, качеству полученных сварных соединений. В результате выполненных исследований найдены оптимальная форма и размеры торцевой части стержня, определяющие условия формирования соединений при выполнении сварки. Определены основные параметры режима рельефной сварки, обеспечивающие требуемое качество сварных соединений стержень-втулка. Даны рекомендации по конструкции и материалам электродов при сварке. Была установлена возможность использования данной технологии рельефной сварки для изготовления петель.

Ключевые слова: стержень, втулка, рельефная сварка, фурнитура, петли.

В настоящее время при изготовлении окон и дверей широко используется фурнитура различных типоразмеров, в частности стальные петли свертные ПВв1, ПВв2, ПВв3 и другие, типы и размеры которых изложены в ГОСТ 5088-2005. Петли должны изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 538-88 и приведенного выше стандарта. Соединение стержней с втулками или скобами во свертных петлях должно выдерживать усилие отрыва не менее 800 Н и иметь хороший внешний вид [1]. Конструктивное исполнение (рис. 1) и технические требования [2], предъявляемые к соединению стержней с втулками в свертных петлях типа ПВв, свидетельствует, что для их изготовления наиболее целесообразно использование контактной сварки, в частности контактной рельефной сварки.

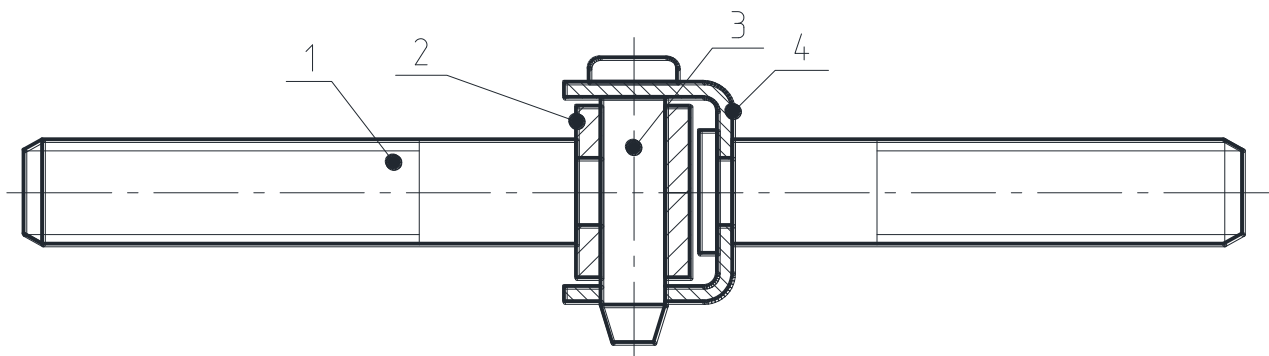


Рис. 1. Петли свертные:

1 - стержень; 2 - втулка; 3 - ось; 4 - скоба

ОАО «Институт сварки России» разработана специализированная полуавтоматическая установка для контактной сварки УТ-03 петли свертной. В тоже время при изготовлении петель свертных, особенно в условиях мелких партий и разных типов, могут быть успешно использованы серийные однофазные точечные машины типа МТ с минимальными изменениями сварочной оснастки (электродов).

Известно [3], что Т-образная рельефная сварка применяется при сварке стержня (шпильки) с пластиной, листом, втулкой, бонкой и т.п. При сварке торцевой поверхности стержня придается различная форма (создается рельеф), в целях создания условий для концентрированного нагрева и благоприятного развития пластических деформаций.

Наиболее часто применяют сферическую и коническую форму торца стержня, как бо-

лее простую в изготовлении при массовом производстве. В зависимости от диаметра стержня угол заточки торцов выбирают в пределах $120 - 170^\circ$. Радиус сферы рекомендуется выбирать равным двум диаметрам стержня. Различные формы подготовки торцов стержней под сварку приведены на рис. 2. Лучшие условия подвода тока и создание усилия в процессе сварки обеспечиваются при наличии на стержне заплечиков (рис. 2, а, б). Сварочное усилие в этом случае передается на рельеф торца стержня посредством заплечиков.

При этом также термодформационный цикл сварки не влияет на резьбу при наличии её на стержне.

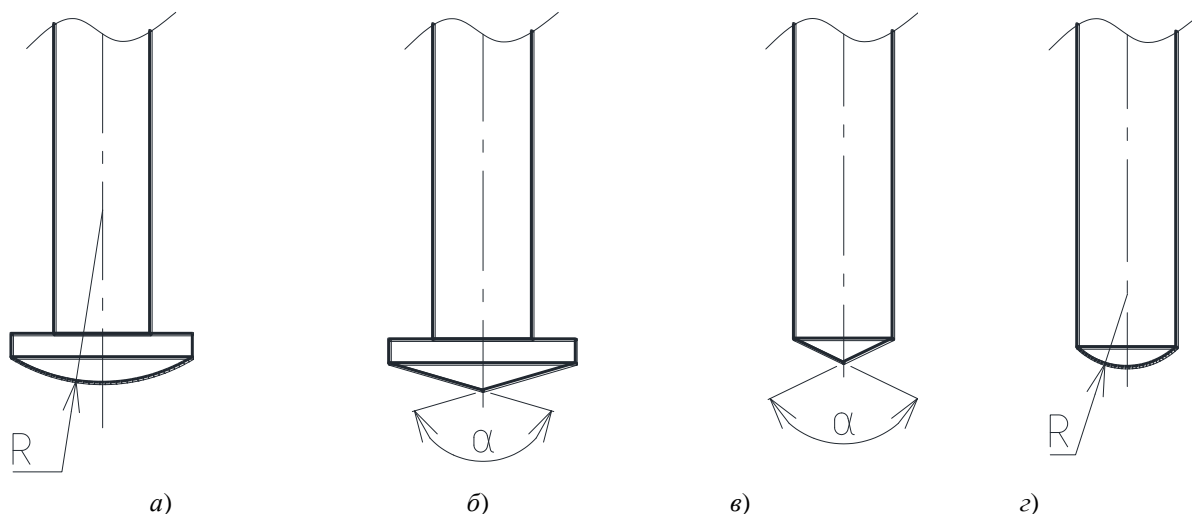


Рис. 2. Различные формы подготовки торцов стержней под сварку

При сварке деталей с заплечиками место контакта с электродом должно быть чистым и свободным от заусенцев, изменяющих условия нагрева, ухудшающих качество сварки и значительно снижающих стойкость электродов.

Единые рекомендации по определению параметров режима Т-образной сварки стержней отсутствуют. При сварке коротких стержней, если не возникает опасность их перегрева, возможен подвод тока с торца. При сварке длинных стержней (шпилек), а также наличии резьбы сварочный ток следует подводить к боковой поверхности вблизи от места сварки.

При Т-образной сварке стержней с заплечиками возможно частичное образование литого ядра в плоскости соединения, для гладких стержней условия образования литого ядра ухудшаются. Большинство соединений получают без образования литой зоны, при этом значительные пластические деформации способны обеспечить необходимое качество сварки в твердой фазе.

Детали перед сваркой должны быть очищены от жира, масла, краски, оксидов и других загрязнений. Вид подготовки поверхности определяется, прежде всего, состоянием поверхности (вид загрязнений), размерами деталей, типом производства, а также конструкцией соединения.

Для соединения стержней с втулками в ввертных петлях типа ПВв2 рельефной сваркой использовались стержни с заплечиками (с опорным буртиком на стержне) как наиболее целесообразные, с различной подготовкой торцевой части (рис. 3).

Сварка выполнялась на серийной контактной точечной однофазной машине переменного тока прессового типа МТ мощностью 75 кВА. При сварке использовался цикл с постоянным сварочным усилием (давлением) и одноимпульсным включением сварочного тока (рис. 4). При выборе циклограммы усилия сжатия электродов, и сварочного тока учитывался материал изделия и его толщина. Циклограмма широко используется при точечной и рельефной сварке.

ефной сварке низкоуглеродистых (незакаливающихся) сталей толщиной до 4–5 мм на универсальных точечных машинах.

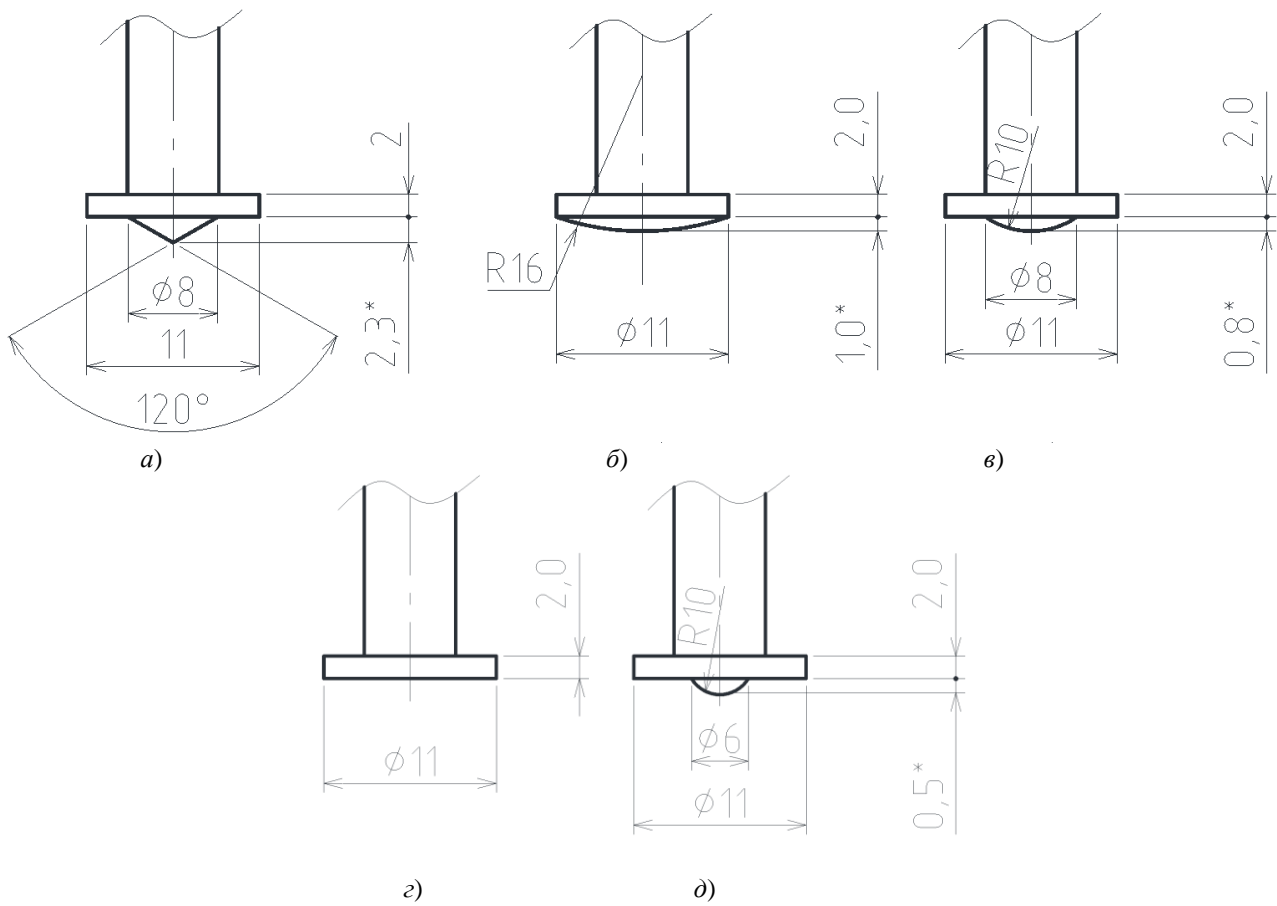


Рис. 3. Форма подготовки торцевой части стержня и основные размеры:
* - размеры для справок

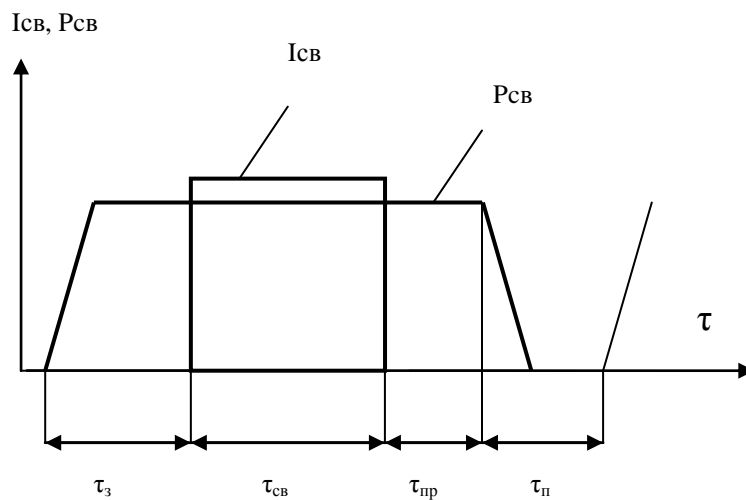


Рис. 4. Циклограмма процесса сварки:
 $I_{св}$ – сварочный ток; $P_{св}$ – сварочное усилие; τ_3 – время зажатия; $\tau_{св}$ – время сварки;
 $\tau_{пр}$ – время проковки; $\tau_{п}$ – время паузы

Цикл может быть реализован с использованием регуляторов цикла сварки РЦС-403, РЦС-502, регуляторов времени на интегральных схемах РВИ-503, РВИ-504, микропроцессорных регуляторах РКМ-803М и других регуляторов времени, имеющих четыре и более регулируемых основных позиций сварочного цикла.

Применялись электроды из хромовой бронзы БрХ как наиболее распространенной при сварке углеродистых и низколегированных сталей. Возможно использование хромоциркониевой бронзы БрХЦр, никельбериллиевой бронзы БрНБТ [3], а также дисперсно-упрочнённых композиционных материалов (ДУКМ), обеспечивающих повышение стойкости электродов.

Для крепления электродов использовались стандартные электрододержатели для точечных машин общего применения. Использовалась конусная посадка электродов, обеспечивающая надежный электрический контакт и хорошую герметичность места соединения. Применялись электроды с внутренней системой охлаждения водой.

При сварке втулка фиксировалась на верхнем электроде с цилиндрической контактной поверхностью под втулку. Расположенный на электроде фиксатор обеспечивал закрепление втулки до сварки, а также удаление стержня из нижнего электрода после выполнения сварки при подъеме верхнего электрода. Стержень вставлялся в нижний электрод с отверстием (рис. 5), размеры которого (d и L) определяются параметрами стержня.

Ввиду малого влияния электродов на процесс нагрева по условиям их стойкости диаметр D торцевой части электродов целесообразно выбирать относительно большим 25-30 мм.

При отработке ориентировочных режимов сварки варьировались основные параметры: сварочный ток, усилие сжатия на электродах, продолжительность протекания сварочного тока (время сварки), значения которых определялись с учетом имеющихся рекомендаций и результатов, полученных в ходе проведения экспериментов.

Качество сварных соединений оценивалось в соответствии с результатами ВИК (визуального и измерительного контроля), при этом учитывалась полнота осадки рельефа, отсутствие выплесков при сварке и результатов механических испытаний выполненных сварных соединений на статическое растяжение (отрыв стержня от втулки).

Данные по форме подготовки торцевой поверхности стержней, ее размерам, а также параметрам режимов сварки и результатам испытаний на статическое растяжение полученных сварных соединений, выполненных с различной подготовкой торцевой поверхности стержня, представлены в табл. 1.

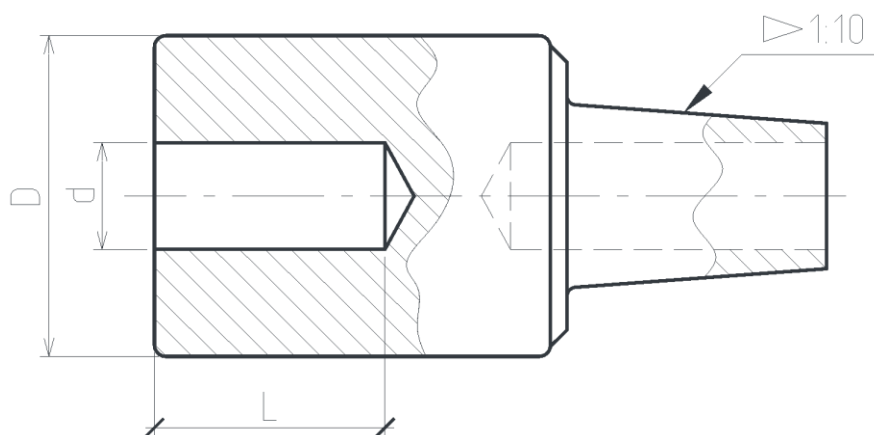


Рис. 5. Нижний электрод

Результаты испытаний сварных соединений на статическое растяжение

№ режима	Форма подготовка торца стержня	Сварочный ток, кА	Усилие на электродах, даН	Время сварки, с	Осадка, мм	Разрушающее усилие при отрыве, даН
1	Конусная (рис. 3, а)	7,5	135	0,16	1,2-1,5	1960-2060*
2	Сферическая (рис. 3, б)	7,5	200	0,2	1,1-1,2	2000-2350*
3	Сферическая (рис. 3, в)	7,5	200	0,2	0,7-0,8	1940-2080*
4	Плоская (рис. 3, г)	7,5	200	0,2	-	580-680
5	Сферическая (рис. 3, д)	7,5	200	0,2	0,4-0,5	2350-2460*

* - разрушение происходит по втулке со сквозным вырывом.

Испытания на статическое растяжение выполнялись на универсальной испытательной машине типа ZD 10/90.

Результаты механических испытаний, визуальный контроль сварных соединений стержней с втулками свидетельствует, что для сварки может быть рекомендован режим 5 с относительно небольшими размерами сферического рельефа на торцевой поверхности стержня (рис. 3, д), обеспечивающий, с одной стороны, хороший вид сварного соединения, а с другой – высокие прочностные свойства соединения.

Внешний вид соединений, характер разрушений приведен на рис. 6.

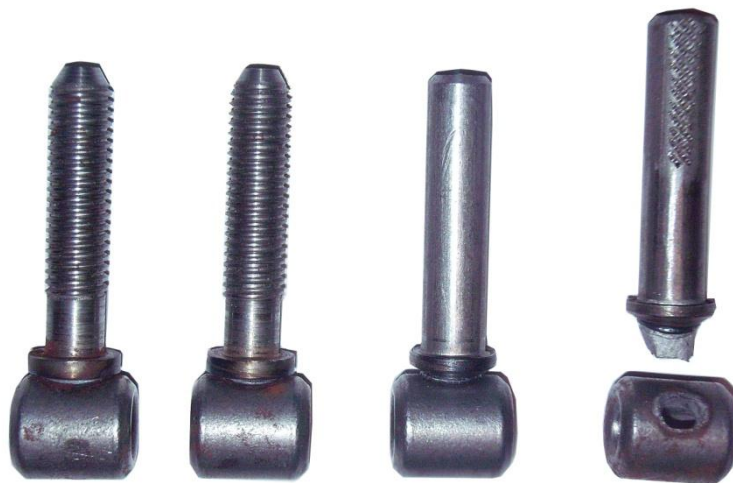


Рис. 6. Внешний вид сварных соединений и характер разрушения при испытаниях на отрыв

При сварке стержней с плоской торцевой поверхностью (рис. 3, г) режим № 4 при хорошем внешнем виде соединения имеет место большой разброс значений разрушающего усилия и их значительно более низкие прочностные характеристики, как следствие недостаточной величины пластической деформации, которые не устраняются с увеличением тока

или длительности его протекания. Дальнейшее увеличение может привести к изменению геометрии втулки и существенному снижению стойкости электродов в процессе сварки.

Полученные результаты позволили оптимизировать режим сварки и подтвердили возможность реализации данной технологии контактной рельефной сварки петли ввертной с использованием серийных контактных точечных машин типа МТ.

Библиографический список

1. ГОСТ 5088-2005. Петли оконные и дверных блоков. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2005.
2. ГОСТ 538-88. Изделия замочные и скобяные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
3. **Гуляев, А.И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей / А.И. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с.

*Дата поступления
в редакцию. 09.12.2013*

S. Yu. Smolensky, A.S. Pavlov

PROJECTION WELDING OF HINGES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article considers the main results of research of possibility to make some barrel hinges using contact projection welding by means of universal point machines.

Findings: The article contains the data on welding technology, welding snap-in and the quality of welded joints. In result of the research determined the optimal shape and dimensions face of the rod, determine the conditions of the formation of compounds in the process of welding. The study identified the main mode settings of projection welding, providing the required quality of welded joints. The article includes recommendations for the design and materials of welding electrodes.

Originality/value: The authors of the article ascertained the possibility of the use of this technology projection welding for manufacture of hinges.

Key words: stud, bush, relief welding, projection welding, furniture, barrel hinges.

УДК 621.74.043.2

Г.И. Белявский, Ю.А. Зиновьев, С.В. Кузнецов

**ЛИТЬЕ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ЗАГОТОВОК,
АРМИРОВАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫМИ ГРАНУЛАМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены различные способы получения литых заготовок, армированных механически легированными гранулами литьем с кристаллизацией под давлением. Рассмотрено влияние методов введения гранул в жидкий металл и выбран наиболее рациональный.

Приведены данные по микротвердости переходного слоя между гранулами и литейным сплавом. Предложенная технология позволяет повысить износостойкость деталей.

Ключевые слова: литая заготовка, литье с кристаллизацией под давлением, механическое легирование, гранулы.

В последние десятилетия успехи материаловедения привели к созданию перспективного класса материалов, названных композиционными, имеющих высокие физико-механические свойства и, благодаря им заставляющие уступать свои позиции традиционные сплавы. В то же время традиционные сплавы и, прежде всего, литейные, отличаются от других материалов легкостью формообразования при использовании литейных технологий, что позволяет им успешно конкурировать при получении сложнопрофильных заготовок.

К сожалению, их возможности ниже, чем у композиционных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Несмотря на это, литейные технологии оказались рационально применимыми при получении биметаллических отливок, одним из компонентов которых являются дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ). Вставки из них хорошо соединяются с литейными сплавами в процессе литья, но представляют собой простейшие геометрические фигуры (диски, кольца, стержни и т.п.).

Следует также отметить, что технология получения вставок длительна и трудоемка. В то же время для достаточно большого ряда изделий, при работе которых градиент температуры плавно изменяется по сечению изделия, а сами изделия работают на истирание, требуется иное решение, позволившее бы упростить технологию и удешевить получение армированных отливок.

Например, использование методов пропитки в ее различных вариантах [1]. Основными преимуществами метода пропитки являются возможность получения практически беспористого материала и равномерное распределение армирующих элементов в композиционном материале. Еще одно преимущество этого метода – возможность получения без дополнительной механической обработки изделий любой конфигурации и использование в большинстве случаев существующего литейного оборудования.

Существует целый ряд разновидностей метода:

- 1) пропитка расплавом при нормальном давлении;
- 2) вакуумное всасывание;
- 3) пропитка расплавом под давлением;
- 4) комбинированные методы пропитки.

Самый простой вариант пропитки заключается в укладке волокон или гранул в форму и заливку в нее под действием гравитационных сил расплавленного или в полужидком состоянии металла.

Существенный недостаток этого метода в наличии после заливки в материале пустот, значительно снижающих прочность композиционного материала.

Значительным шагом вперед является метод пропитки вакуумным всасыванием, но и он имеет недостаток, присущий всем методам пропитки, - необходимость нагрева армирующего материала до температур, сравнимых с температурой расплава, что может отрицательно влиять на прочность композиционного материала.

Наибольший интерес представляют комбинированные методы пропитки, например, пропитка под давлением с предварительным вакуумированием формы. Однако все методы пропитки ориентированы на пропитку расплавом, имеющим относительно высокий перегрев. Для ДУКМ на основе алюминия подобная технология не может обеспечить требуемого качества, поскольку ДУКМ теряют значительную часть своих свойств. Кроме того, процессы пропитки имеют и ряд других недостатков: значительная длительность процесса; высокая температура подогрева рабочей оснастки и в связи с этим низкая стойкость оснастки.

Наиболее удачным решением может быть получение алюминиевых отливок, армированных механически легированными гранулами [2], при использовании процесса литья с кристаллизацией под давлением [3].

При исследовании возможностей получения отливок, армированных гранулами ДУКМ, использовали четыре основных варианта: первый – замешивание гранул в расплав перед заливкой его в матрицу; второй – введение гранул в струю жидкого металла, как это обычно делается при суспензионном литье; третий – засыпка порции гранул на дно матрицы с последующей заливкой жидкого металла; четвертый – засыпка порции гранул между двумя дозами жидкого металла.

Получение опытных образцов всех четырех вариантов осуществлялось на установке, схематически изображенной на рис. 1.

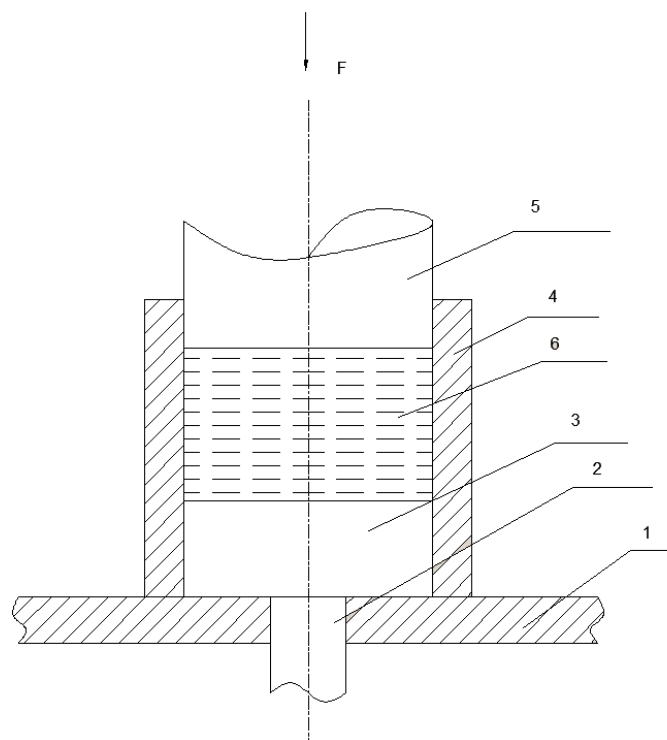


Рис. 1. Принципиальная схема установки:

1 - монтажная плита; 2 – шток нижнего цилиндра гидропресса;
3 – выталкиватель; 4 – матрица; 5 – пуансон; 6 – расплав

Полученные заготовки были подвергнуты исследованиям, при которых оценивался охват жидким металлом гранул и определялось наличие переходного слоя по границам гра-

нул. В образцах первого варианта, в связи с тем, что матричный сплав необходимо перегреть до температуры 670°C , гранулы частично расплавились, что хорошо подтверждается размытыми контурами гранул. В образцах второго варианта при относительно высокой ($620\text{--}670^{\circ}\text{C}$) температуре заливаемого сплава отдельные гранулы растрескивались, но, благодаря высокому давлению, прилагаемому к расплаву (120 МПа), трещины в гранулах заполнялись матричным сплавом. Образцы третьего варианта (рис. 2) дали наихудший результат, поскольку в нижней части заготовки происходило осыпание части гранул из-за недостаточной пропитки, что связано с охлаждением матричного сплава.

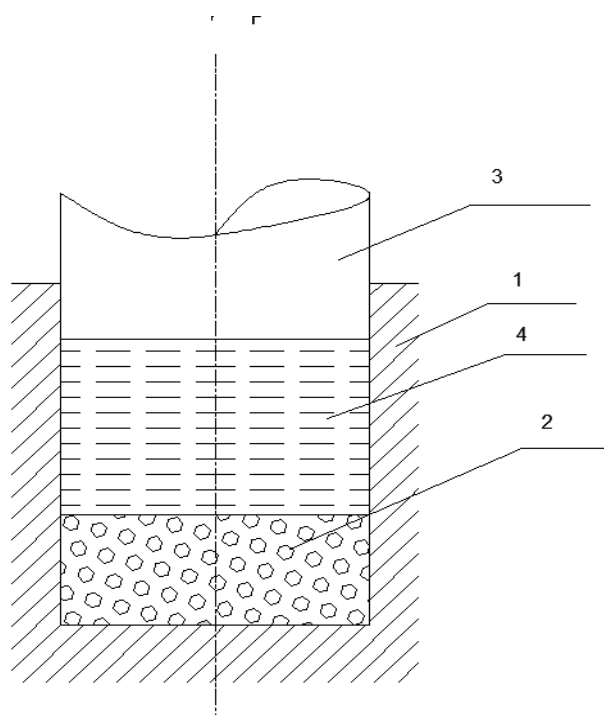


Рис. 2. Схема третьего варианта:

1 – матрица; 2 – слой гранул ДУКМ; 3 – пуансон; 4 – жидкий сплав

Насыпной слой гранул пропитывался не на всю толщину, что связано с быстрой потерей тепла первых порций заливаемого сплава и потерей тепла гранулами, поскольку и сплав, и гранулы отдают тепло, соприкасаясь со стенками и дном матрицы, нагретыми до значительно меньшей температуры ($240\text{--}320^{\circ}\text{C}$). Более высокие температуры нагрева матрицы и гранул приводят к преждевременному выходу матрицы из строя и потере свойств гранулами ДУКМ. Существует и разновидность третьего варианта, когда порция гранул засыпается поверх залитой порции жидкого расплава (рис. 3), что позволяет несколько улучшить охват гранул жидким металлом. Но осыпание гранул имеет место.

Оценивая описанные варианты, можно сказать, что все они имеют значительные недостатки, затрудняющие их использование для получения армированных заготовок.

Остается четвертый вариант, который и был выбран как наиболее рациональный. Заливка порции жидкого металла в качестве подложки, на которую насыпается порция гранул ДУКМ, позволяет поддерживать на приемлемом уровне температуру гранул при их пропитке под давлением порцией жидкого металла, залитого поверх засыпанных гранул (рис. 4).

Микроструктура отливок, армированных механически легированными гранулами, состоит из гранул, хаотически расположенных в алюминиевой матрице. Сама алюминиевая основа имеет мелкозернистую структуру без пор и раковин, а границы гранул четкие.

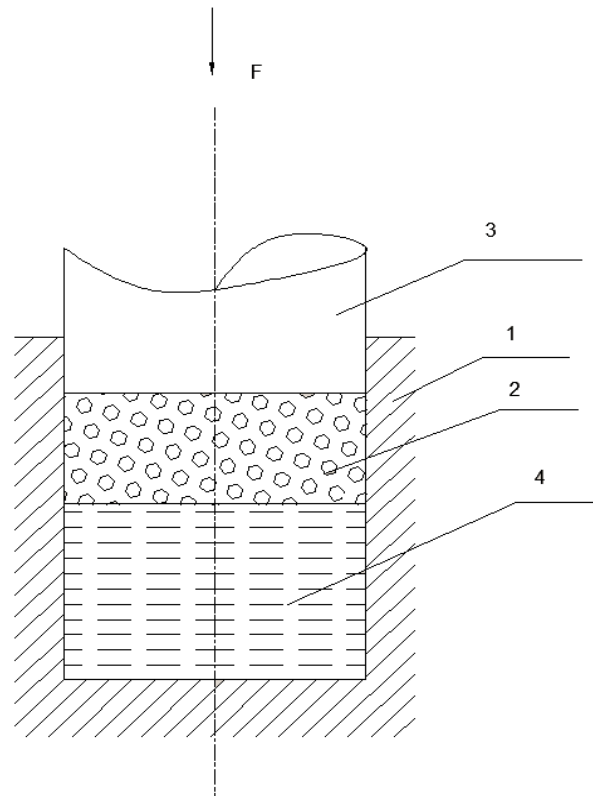


Рис. 3. Разновидность третьего варианта:

1 – матрица; 2 – слой гранул ДУКМ; 3 – пуансон; 4 – жидкий сплав

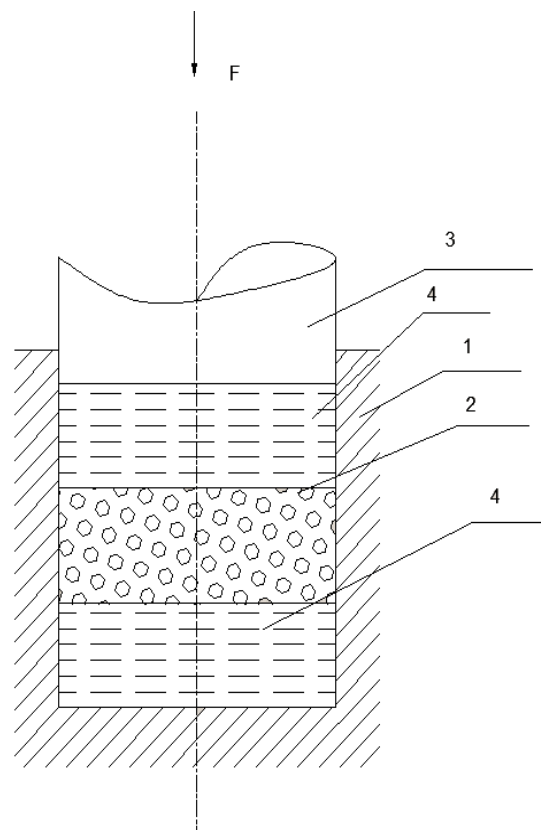


Рис. 4. Схема четвертого варианта:

1 – матрица; 2 – слой гранул; 3 – пуансон; 4 – первая порция расплава;
5 – вторая порция расплава

С целью более детального изучения структуры отливок проводились измерения микротвердости на границе гранул и матричного сплава, данные о которых приведены в табл. 1. Отсутствие части данных по замеру микротвердости на границе раздела связано с тем, что разрешающая способность прибора при замерах составляла 0,1 мм.

Таблица 1

№ п/п	Варианты	Н, кг/мм ²		
		основа	гранулы	граница
1	Замешивание гранул в расплава	1200	1460	-
2	Засыпка в струю расплава	1225	1360	-
3	Засыпка между дозами расплава	1050	1250	1150

Полученные в четвертом варианте образцы были испытаны на растяжение, в качестве контроля брались свойства матричного сплава по ГОСТ. Результаты испытаний показали, что до известных пределов рост количества гранул в образцах мало влияет на механические свойства, что подтверждается данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Состояние гранул	σ_b , МПа	Примечание	Вес засыпки, кг	Давление прессования, МПа
1	Термообработанные	195,52	Все образцы получены за- сыпкой порции гранул между слоями жидкого сплава АЛ25	0,030	125
2	Термообработанные	121,25		0,050	125
3	Термообработанные	137,31		0,070	125
4	Термообработанные	126,25		0,040	125
5	Термообработанные	185,80		0,020	125
6	Нетермообработанные	146,76		0,040	125
7	Термообработанные	84,37		0,024	125

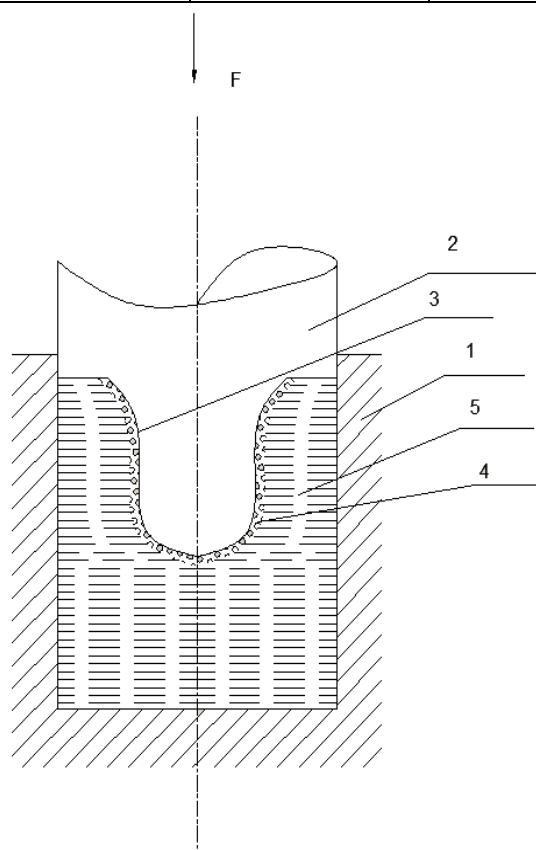


Рис. 5. Схема процесса получения армированной заготовки:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – замороженный сплав; 4 – гранулы ДУКМ; 5 – расплав

Анализ результатов позволил предложить еще один вариант получения армированных заготовок, схема которого приведена на рис. 5.

Процесс получения заготовок по схеме на рис. 5 представляет следующее. Пуансон погружают на короткое время в матричный расплав для намораживания слоя матричного сплава, затем пуансон с намороженным слоем погружают в емкость с гранулами ДУКМ, где они прилипают к поверхности пуансона. Следующей операцией является прессование пуансоном порции матричного сплава, залитого в пресс-форму.

Такая схема позволила получить поверхностно-армированную отливку типа «стакан», работающую в условиях абразивного износа. Исследования полученных отливок показали, что поверхностный слой с гранулами ДУКМ практически не имеет дефектов, охват гранул расплавом – качественный.

Выводы

1. Выявлена возможность получения объемно- и поверхностно-армированных гранулами ДУКМ отливок.
2. Проведенные исследования позволили ответить утвердительно на вопрос о высоком качестве опытных отливок. Результаты испытаний на растяжение это подтверждают.
3. Использование гранул ДУКМ, вместо вставок, изготовленных из профилей ДУКМ, в ряде случаев позволяет значительно удешевить процесс получения качественных заготовок и снизить расход упрочняющего материала.

Библиографический список

1. Структура и свойства композиционных материалов / К.И. Портной [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.
2. Шалунов, Е.П. Алюминиевые материалы, дисперсноупрочненные карбидом алюминия / Е.П. Шалунов, Я.М. Липатов, И.В. Дакилов // Современные технологические процессы получения высококачественных отливок, повышения стойкости литейной оснастки и режущего инструмента: тез. докл. к межреспублик. семинара. – Чебоксары: Чув. ун-т, 1987. С. 152–153.
3. Батышев, А.И. Штамповка жидкого металла / А.И. Батышев. – М.: Металлургия, 1980. – 199 с.
4. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.

*Дата поступления
в редакцию. 09.12.2013*

G.I. Belyavsky, Yr.A. Zinoviev, S.V. Kuznetsov

PRODUCING CAST BLANKS REINFORCED WITH MECHANICALLY ALLOYED GRAINS VIA CASTING WITH CRYSTALLIZATION UNDER PRESSURE

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Discovery of the most rational method for cast sections manufacturing reinforced with mechanically alloyed grains.

Methodology: Usage of crystallization under pressure in casting process for sample production.

Findings: The mechanical tests held, and microstructural examination of the obtained samples, showed that the suggested variant of reinforced cast sections production can improve their quality.

Originality/value: The suggested technology can be used for surface-reinforced casts that undergo abrasive wear when used.

Key words: cast blanks, casting with crystallization under pressure, mechanically alloyed grains.

УДК 621.745

Ю.А. Зиновьев¹, А.А. Колпаков², С.В. Кузнецов¹, В.Д. Швецов¹, Г.И. Белявский¹**СОЗДАНИЕ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОСЕРНИСТОГО И ВЫСОКОСЕРНИСТОГО ЧУГУНОВ ОДНОЙ ПЛАВКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
ОАО «ГАЗ»²

Приведен обзор технологий получения литых распределительных валов и предложен новый способ получения с целью повышения его износостойкости введением новых добавок кальция с серой. Одновременно была решена проблема базовой плавки в одной печи низкосернистого чугуна для коленвалов и высокосернистого для распредвалов путем совместного введения серосодержащих веществ вместе с ферромарганцем в ковш.

Ключевые слова: отливка, отбеленный чугун, распредвал, модификаторы, добавки.

Задачи повышения эффективности автомобильной техники, увеличения ее долговечности, снижения металлоемкости не могут быть решены без непрерывного совершенствования техники и технологии литейного производства. Поэтому в программах развития и технического перевооружения литейного производства, отражающих наметившиеся в мировом автомобилестроении тенденции, предусматривается совершенствование структуры потребления литых заготовок из высококачественного чугуна с применением прогрессивных технологических процессов, оборудования и средств автоматизации.

Одной из деталей распределительного механизма современного автомобильного двигателя, от которой в значительной степени зависит надежность и долговечность работы самого двигателя, является распределительный вал. Изнашивание деталей газораспределительной системы связано с протеканием сложных механических и теплофизических процессов, включающих трение при высоких удельных нагрузках в условиях граничной смазки и наличие некоторого количества абразивных частиц в сопряжениях трущихся поверхностей. Именно в таких условиях контактных нагрузок и высоких скоростей относительного перемещения пар трения поверхностей кулачков и толкателей работает распределительный вал.

Современные тенденции развития производства высокооборотных автомобильных двигателей повышенной мощности выявили необходимость борьбы с преждевременным износом распределительных валов.

Возможность замены стали как материала распредвалов на чугун продолжала оставаться в поле зрения автомобилестроителей. Повышенный интерес к чугуну в последние годы вызван тем, что в условиях массового производства автомобильных двигателей, наряду со значительной износостойкостью, распределительные валы должны быть не только технологичными, но и экономически выгодными [1]. Чугун наиболее полно удовлетворяет этим требованиям.

Служебные характеристики литых деталей из отбеленных чугунов в сочетании с заданной твердостью рабочих поверхностей позволяют достичь в распределительных валах износостойкости, превышающей этот показатель в аналогичных стальных заготовках, что открывает большие возможности по экономии стального проката, снижению трудоемкости механической обработки за счет получения отливок уменьшенной массы и близких по конфигурации к готовой детали.

Стальные распределительные валы по эксплуатационным и технологическим показателям уступают современным чугунным валам (особенно при использовании их в высокооборотных двигателях). Дело в том, что вследствие меньшего модуля упругости чугуна в сравнении со сталью его применение способствует значительному снижению контактных напряжений. В чугуне можно осуществлять регулирование содержания карбидов, которые

резко повышают износостойкость, являющуюся одним из важнейших показателей материала распределительных валов и пропорциональную, как известно, поверхностной твердости. Применение отбеленных чугунов позволяет получать необходимую твердость не менее 49 HRC. Достаточно хорошая теплопроводность чугуна снижает температурные напряжения в валах.

В то же время в большинстве случаев распределительный вал слабо нагружен, поэтому требования к прочности материала минимальны ($\sigma_e < 250$ МПа). В таких условиях применение чугуна, способного уменьшать динамические знакопеременные нагрузки и колебания, наиболее выгодно.

Максимальная износостойкость обеспечивается за счет создания на трущихся поверхностях отбеленного слоя. Достигается это применением целого ряда технологических приемов, таких как установка в литейную форму индивидуальных холодильников, изготовление биметаллических деталей (толкателей, рычагов, клапанов), рабочая поверхность которых выполнена наплавкой белого чугуна или применением вставок из такого чугуна.

В последнее время разработан еще один метод упрочнения кулачков чугунных распределительных валов и рычагов клапанов путем оплавления поверхностного слоя (толщиной около 1 мм) при помощи точечного источника энергии.

Получение высококачественной отбеленной зоны кулачка, стабильной по расположению, может быть достигнуто в результате использования различных способов литья. При этом требуется организация специализированных смежных участков по всему циклу производства, в том числе для изготовления точных металлических холодильников, предназначенных для формирования качественного отбеленного слоя.

В тенденциях развития производства чугунных распределительных валов за рубежом просматриваются следующие основные направления: получение отливок с однородной структурой и последующей поверхностной закалкой кулачков и эксцентриков ТВЧ или поверхностным точечным оплавлением, а также получение отливок с уже отбеленным, поверхностным слоем кулачков и эксцентриков, имеющим высокую твердость и износостойкость.

Как правило, распределительные валы из серого чугуна отливают в сырых песчано-глинистых либо в песчано-смоляных оболочковых формах. При этом заданная твердость кулачков достигается поверхностным (пламенным или индукционным) нагревом до 800-840°C с последующей закалкой на мартенсит либо за счет установки в форму холодильников. В последние годы фирма Ford Motor Co's Caeting Division (США) и её канадские отделения производят отливки распределителей методом литья по газифицируемым моделям [2].

Фирмой AEG-Elotherm (ФРГ) были внедрены в производство первые промышленные установки для получения отбеленных отливок распределительных валов, способом, суть которого сводится к тому, что поверхность литой заготовки оплавляется в атмосфере инертного газа с помощью электрической дуги между вольфрамовым электродом и заготовкой. При последующем естественном охлаждении расплава вследствие захлаживающего действия массы отливки образуется ледебуритная структура с твердостью до 56 HRC. Способ выигрывает в сравнении с индукционной закалкой в части прочностных возможностей валов, но достигаемая с его помощью небольшая глубина упрочненного слоя чревата опасностью образования в нем газовых раковин, пор, микротрещин, что значительно снижает его преимущества [1, 3].

Хотя получение отбеленных отливок при помощи индивидуальных холодильников представляет собой трудоемкий процесс, включающий изготовление, подготовку и сборку в литейной форме большого количества холодильников, этот метод нашёл сейчас наибольшее применение в практической деятельности ряда фирм для различных марок серых чугунов.

Процесс получения распределительных валов, отбеленных при помощи холодильников, не только обеспечивает высокую износостойкость, но и позволяет расширить пределы химиче-

ского состава чугуна, ликвидировать недостатки, присущие подвергаемым закалке деталям (необходимость рихтовки, образование трещин, отслоение закаленного слоя и т.д.) [4, 5].

Английские и японские производители придерживаются одного мнения в оценке эффективности использования отбеленных чугунов при получении распредвалов автомобильных двигателей. При высоких скоростях охлаждения (от холодильника) наружный слой отливки имеет структуру белого чугуна, в котором углерод находится в связанном состоянии, в виде карбидов, сердцевина - серый чугун, а переходный слой представляет собой структуру чугуна половинчатого. Карбидообразующие элементы Cr и Mn способствуют стабилизации карбидов, измельчению перлита, увеличению прочности, твердости, износостойкости материала. В развитых странах подавляющее число распредвалов автомобильных двигателей изготавливают из отбеленного чугуна.

Результаты активных многофакторных исследований влияния химического состава металла на качество распредвалов и практический опыт в этой области подвели специалистов-литейщиков к мысли о том, что наиболее рациональным материалом для литых заготовок рассматриваемой детали является серый чугун с заданным содержанием компонентов. Так, по мнению польских специалистов, чугунный распредвал, отлитый в песчаной форме с холодильниками соответствующей толщины (5-20 мм), не нуждается в индукционной закалке, если химический состав серого чугуна соответствует следующему соотношению элемента, %: C 3,1-3,5; Mn 0,5-0,8; Si 1,8-2,2; Cr 0,7-0,9; Ni 0,15-0,3; Cu 0,3-0,7; S ≤ 0,15; P ≤ 0,2 [6].

Для распределительных валов, требующих более высокого сопротивления точечной коррозии и истиранию, фирма Riken Co (Япония) использует отбеленный чугун марки RIK-C3 несколько иного химического состава (вес, %): C 3-3,8; Si 1,6-2,8; Mn 0,5-1,0; P ≤ 0,3; S ≤ 0,15; Cr 0,1-1,0; Ni 0,2-1,0; Mo ≤ 0,5. Поверхностная твердость на носике кулачка достигает 47 HRC [7]. При этом следует отметить, что в литейных цехах фирмы распределительные валы получают в разовых песчаных формах на автоматических линиях. Одним из предлагаемых способов изготовления подобных литых заготовок является литье в оболочковые формы [7,8], где оболочку в опоке располагают горизонтально. С целью повышения эффективности отбеливания кулачков в форме устанавливают холодильники, при этом глубина отбела достигает 3,5-4,0 мм. Рекомендуемая температура заливки 1280-1370°C [8].

Фирма Рено (Франция) распределительные валы отливает из чугуна с искусственным отбелом холодильниками, химический состав чугуна, %: C 3,3- 3,4; Mn 0,8-1,0; Si 1,5-1,8; P ≤ 0,05; S ≤ 0,05; Mo 0,15-0,2. При этом глубина отбела - 5 мм, припуск на обработку - 2 мм, твердость отбеленного слоя 48-50 HRC.

Фирма Вольво (Швеция) изготавливает распределительные валы с закалкой кулачков. Чугун содержит Mo до 0,5%, Ni до 0,5%, Cr до 1%.

В России распредвалы отливаются с отбеливанием холодильниками кулачков (ОАО «ГАЗ»), точечным оплавлением носиков кулачков (ОАО «ВАЗ») и отбеливанием кулачков в кокилях [9].

По данным российских исследователей оптимальным химсоставом является, %: C 3,5-3,6; Mn 0,75-0,95; Si 1,9-2,2; P ≤ 0,2; S 0,1-0,15; Cr 0,2-0,3. При этом твердость отбеленного слоя достигает 52-53 HRC, а глубина 9,5-14 мм [9].

Исследователь [10] рекомендует для повышения износостойкости литых отбеленных изделий вводить хром, который стабилизирует карбидную фазу, увеличивает твердость и износостойкость отбеленного слоя, а также марганец, активно подавляющий перлитное превращение аустенита железоуглеродистых сплавов.

Установлено, что, несмотря на наличие нескольких новых технологий, применяемых в настоящее время при производстве износостойких распределительных валов (комбинированные валы с кулачками из металлокерамики, либо наплавка на кулачки износостойкого сплава), валы с отбеленными кулачками остаются вне конкуренции. Подобная оценка

вытекает из сравнительных данных таких параметров, как износостойкость, технология производства и экономическая целесообразность.

Для повышения твердости и глубины отбелённого слоя увеличивали количество карбидообразующих элементов, например, при введении теллура увеличивалась не только глубина и твердость отбелённого слоя на кулачках, но и происходил отбел на других элементах вала. При введении большого количества хрома, увеличивалась не только глубина и твердость отбелённого слоя на кулачках, но и увеличивалось количество усадочных дефектов (утяжин) между опорными шейками и стержнем вала. Уменьшение количества хрома исключало усадочные дефекты в элементах вала, но и уменьшало глубину и твердость отбелённого слоя носиков кулачков. Решением этого противоречия было введение комплексной добавки, содержащей кальций и серу [11]. Сера стабилизировала глубину и твердость отбелённого слоя при оптимальном содержании хрома и марганца в чугунах, кальций графитизировал металл в стержне вала.

Отбел на кулачках стал получаться чётким, с высокой твердостью, достаточной глубиной отбела и без включений точечного графита, но без цементита в стержне вала и усадочных дефектов в элементах вала. Твердость кулачков выравнилась [11].

Анализ зарубежной и отечественной практики изготовления литых распределительных валов позволяет сделать следующие выводы:

1. Литые распределительные валы из чугуна превосходят штампованные стальные заготовки по эксплуатационным, технологическим и технико-экономическим показателям, что приводит к получению большого экономического эффекта.

2. Из всех способов получения литых чугунных распредвалов, максимальный технико-экономический эффект обеспечивают чугунные распределительные валы, получаемые с отбелом кулачков с помощью холодильников в литье.

3. Ввод комплексной добавки с кальцием и серой дал возможность стабилизировать технологию распредвалов в массовом производстве по глубине отбела и твердости кулачков и исключил усадочные дефекты, а также цементит в стержне вала.

В дальнейшей работе возникла проблема плавки чугуна в одной печи не только высокосернистого для распредвалов, но и низкосернистого для коленвалов. Поэтому задачей следующей работы было исключение ввода серосодержащего вещества в шихту печи, так как металл в печи стал базовым для получения низкосернистого высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для коленвалов, а серосодержащее вещество надо было вводить в ковш.

Известен способ получения отливок автомобильных распредвалов [12]. Недостатком данного способа является недостаточная глубина отбела на носиках кулачков и наличие цементита в опорных шейках. Наиболее близким к предлагаемому способу по технической сущности и достигаемому результату является способ получения отбеленных износостойких отливок [13]. Недостаток данного способа – низкая эффективность его применения при вводе гипса в ковш.

Задачей данной работы было исследование эффективности различных способов ввода серосодержащих веществ в ковш.

На АОО «ГАЗ» в условиях литейного цеха были проведены опытные сравнительные плавки получения распредвалов известным и предложенным способами. Чугун выплавляли в дуговой печи с кислой футеровкой. В качестве шихты использовали чушковые передельные чугуны, возврат чугуна СЧ21, отходы стали, ферросилиций, ферромарганец, феррохром и коксик.

Металл перегревали в печи до 1520°C, выливали в передаточный ковш, а из него – в три заливочных ковша. Заливка форм распредвалов велась при 1360-1420°C тремя вариантами: 1-й вариант – с добавкой гипса в печь; 2-й вариант – с добавкой гипса в ковш и 3-й вариант – с добавкой гипса вместе с ферромарганцем в ковш.

Таблица 1

Способ получения отливок	Вариант №	Химанализ, %						Увеличение серы, %	Количество гипса, %		Совместно, в ковш: (гипс+FeMn70),%
		C	Si	Mn	Cr	P	S		В печь	В ковш	
	исходный	3,81	1,75	1,02	0,32	0,075	0,012	-	-	-	-
Известный	1	3,80	1,76	1,03	0,31	0,075	0,02	170	0,08	-	-
	2	3,81	1,79	1,02	0,30	0,074	0,022	180	0,1	-	-
	3	3,78	1,76	1,03	0,30	0,074	0,052	430	0,4	-	-
	4	3,76	1,78	1,02	0,29	0,073	0,072	600	0,6	-	-
	5	3,74	1,80	1,04	0,29	0,072	0,096	800	0,8	-	-
	6	3,72	1,87	1,05	0,28	0,068	0,102	900	0,9	-	-
	1	3,80	1,78	1,02	0,32	0,075	0,015	125	-	0,08	-
	2	3,81	1,79	1,03	0,31	0,074	0,019	150	-	0,1	-
	3	3,79	1,79	1,02	0,30	0,074	0,028	230	-	0,4	-
	4	3,78	1,80	1,02	0,29	0,073	0,042	350	-	0,6	-
	5	3,77	1,81	1,01	0,28	0,073	0,056	470	-	0,8	-
	6	3,76	1,89	1,00	0,28	0,072	0,070	580	-	0,9	-
Предлагаемый	исходный	3,82	1,77	0,30	0,32	0,074	0,013	-	-	-	-
	1	3,81	1,78	1,21	0,33	0,073	0,018	150	-	-	0,08+3,0
	2	3,80	1,79	1,18	0,32	0,074	0,021	175	-	-	0,1+3,0
	3	3,79	1,80	1,17	0,29	0,073	0,044	370	-	-	0,4+3,0
	4	3,78	1,81	1,18	0,28	0,072	0,066	550	-	-	0,6+3,0
	5	3,78	1,83	1,19	0,28	0,073	0,088	730	-	-	0,8+3,0
	6	3,77	1,81	1,20	0,28	0,074	0,100	800	-	-	0,9+3,0

Таблица 2

Способ получения отливок	Вариант №	Твердость кулачков, HRC	Величина отбела на кулачках, мм	Твердость опорной шейки, HB 5/750/10	Микроструктура опорной шейки
Известный способ	1	46	6,8	179	ПГф1,2-ПГд45-90-ПГр1,2-ПГ10-П85(Ф15)
	2	49,7	7,8	190	ПГф1,2-ПГд45-90-ПГр1,2-ПГ10-П96(Ф4)
	3	49	8,6	197	ПГф1,2-ПГд45-ПГр1-ПГ10-П96(Ф4)
	4	52	8,9	217	ПГф1,2-ПГд45-ПГр1-ПГ10-П(Ф0)
	5	53	9,2	229	ПГф1,2-ПГд45-ПГр1,2-ПГ10-П(Ф0)
	6	58	11	260	ПГф1,2-ПГд45-ПГр1,2-ПГ10-П(Ф0) Ц6-Цп2000
Предлагаемый способ	1	47	7,0	187	ПГф1-ПГд45-ПГр1,2-ПГ10-П96(Ф4)
	2	49	8,4	220	ПГф1-ПГд45-ПГр1-ПГ10-П(Ф0)
	3	51	8,8	229	ПГф1,2-ПГд45-90-ПГр1-ПГ10-П(Ф0)
	4	53	9,2	235	ПГф1-ПГд45-ПГр1-ПГ10-П(Ф0)
	5	55	9,4	240	ПГф1-ПГд45-ПГр1-ПГ10-П(Ф0)
	6	60	12	260	ПГф1-ПГд25-ПГр1,2-ПГ10-П(Ф0) Ц4-Цп2000
Технические условия		≥49 HRC -3мм	≥ 7,8 мм	190-255	Феррита до 8%., цементит не допускается

В табл. 1 приведены химсоставы распресвалов с различным количеством введенных добавок гипса. В табл. 2 даны твердости кулачков, величины чистого отбела на кулачках, твердости опорных шеек и их микроструктура в зависимости от разного способа введенного в чугун гипса. Серосодержащее вещество – гипс – попробовали ввести в ковш. Усвоение серы было небольшим (табл. 1, 230-470%) по сравнению с вводом в печь (400-800%). При совместном вводе в ковш гипса и ферромарганца усвоение серы увеличилось и стало 370-730%. В табл. 2 приведены механические свойства и структура - твердость и величина отбела кулачков выше у предлагаемого способа, чем у известного, что повышает износостойкость кулачков распресвала по новому способу. В структуре опорной шейки известного способа имеется цементит. В опорной шейке предлагаемого способа цементита и феррита нет. Структура стабильно-перлитная и твердость выше, что улучшает и их износостойкость. Как видно из табл. 1 и 2, совместный ввод гипса и ферромарганца в ковш дает максимальный положительный эффект: увеличение усвоения серы в ковше (варианты 2-5, табл. 1 предлагаемого способа), увеличение отбеленного слоя со стороны холодильников (варианты 2-5, табл. 2 предлагаемого способа) и исключение «отбела» в центральной части отливки распресвала.

Поскольку усвоение серы в известном способе, в ковше, ниже, чем в печи (как видно из табл. 1), вариант ввода одного гипса в ковш в табл. 2 уже не рассматривается.

Ввод 0,08 % гипса с ферромарганцем в ковш (вариант 1 предлагаемого способа) дает недостаточную величину отбела на носиках кулачков распресвала. Начиная с 0,1% до 0,8% гипса, введенного с ферромарганцем в ковш, получается стабильно нормированная величина отбела на носиках кулачков и полностью отсутствует цементит в опорных шейках (варианты 2-5).

Ввод 0,9% гипса с ферромарганцем в ковш является уже излишним, так как приводит к появлению цементита в опорных шейках и завышенной их твердости (табл. 2, вариант 6). Таким образом, ввод 0,1-0,8% гипса вместе с ферромарганцем в ковш дает самый оптимальный положительный эффект, увеличение твердости и глубины отбеленного слоя со стороны холодильника (и исключение отбела в центральной части элементов отливки), что повысило износостойкость распресвала.

Таким образом, был разработан и внедрен новый технологический процесс плавки в одной плавильной печи: низкосернистого для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для коленвалов и высокосернистого серого чугуна для распресвалов повышенной износостойкости [14].

Библиографический список

1. **Крючков, О.Н.** Износостойкость литых деталей газораспределительного механизма автомобильных двигателей / О.Н. Крючков, М.М. Левитан // Автомобильная промышленность, 1986. №1. С. 3–11.
2. **Martha, K. Siebel.** Evaporative pattern casting. The process and its potential // Modern Casting, 1986. №1. Р. 31.
3. **Чуркин, В.С.** Управление технологическими факторами с целью получения отливок с регламентированной структурой на примере производства износостойких автомобильных валов в облицованных кокилях // Автореферат диссертации канд. техн. наук 05.16.04. – М., 1982. С. 22–23.
4. **Clark, R.** Widening scope for iron casting // Metal Bull. Mon., 1986, № 182. Р. 85–88.
5. Литейное производство в автомобильной промышленности Японии // Автомобильная промышленность, 1984. №6. С. 37–38.
6. Заявка №251177, ПНР, МКИ В 22 С, С 22 С. Способ изготовления распределительных валов двигателей внутреннего сгорания из серого чугуна // Изобретения за рубежом. Опубликовано 86.07.01. №13.
7. Заявка 58-112651, Япония, МКИ В 22 Д 25/02, В 22 Д 18/06. Литьё в оболочковые формы распределительных валов / Маэсава Сэй [et al.]. №56-209289. Заявл. 25.12.81, Опубл. 05.07.83.
8. **Платонов, Б.П.** Литые распределительные валы автомобильных двигателей / Б.П. Платонов, А.А. Колпаков // Труды НГТУ, 1997. С. 56–59.

9. **Матвеева, М.О.** Разработка чугунов с повышенными эксплуатационными свойствами // Литейное производство. 2007. №9, С. 2–5.
10. А. с. №1206328. Присадка для легирования сплавов кальцием и серой / Зиновьев Ю.А. [и др.]. С22С35/00. Бюл. №3. 1986.
11. А.с. 980955, М.Кл. В22Д27/04. Способ получения отливок автомобильных распределительных валов / Б.П. Платонов, А.А. Колпаков. Бюл. № 17. 1989.
12. Пат. №2254207. Способ получения отбелённых износостойких отливок / Зиновьев Ю.А. [и др.]. Бюл. № 17. 2005.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

**Yu.A. Zinoviev¹, A.A.Kolpakov², S.V.Kuznetsov¹, V.D. Shvetsov¹,
G.I. Belyavsky¹**

CREATING THE BASE TECHNOLOGY OF PRODUCING SAME-HEAT LOW-SULFUR AND HIGH-SULFUR IRONS

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «GAZ²»

Purpose: Low-sulphur iron for crankshaft and high-sulphur iron for camshaft cast at one blow.

Methodology: Addition (introduction) of various alloying agents into liquid ladle cast iron, and structure and properties examination of samples and parts.

Findings: New compound agents for ladle cast iron made it possible to found base iron for cast products of different composition in one furnace.

Originality/value: The originality is protected by two invention patents.

Key words: casting, chilled iron, distributing shaft, inoculants, additions.

УДК 621.74.043.2

Г.И. Белявский, С.В. Кузнецов, Ю.А. Зиновьев, В.Д. Швецов

**ЛИТЬЕ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Работа посвящена изучению физико-механических свойств биметаллических отливок, полученных литьем с кристаллизацией под давлением (ЛКД) с использованием литейного сплава и вставки из дисперсно-упрочненного композита (ДУКМ), полученного механическим легированием.

Рассмотрено влияние технологических параметров процесса литья и состава композиционного материала на повышение прочностных характеристик переходного слоя биметалла.

Ключевые слова: литье с кристаллизацией под давлением, биметаллическая отливка, дисперсно-упрочненный композиционный материал.

Перспективы развития машиностроения тесно связаны со снижением материалоемкости, энергоемкости и доли механической обработки при получении деталей машин и механизмов, а также с увеличением срока службы этих деталей. В связи с этим большое значение в последние годы приобретают повышенные требования, предъявляемые к материалам, и поиски новых технических решений. Наиболее доступными и дешевыми конструкционными материалами при получении заготовок являются литейные сплавы, а технологическими процессами, реализующими возможности литейных сплавов, - различные виды литья. Однако, обладая хорошей формозаполняемостью при получении отливок практически любой конфигурации и достаточно неплохими механическими свойствами, литейные сплавы имеют и ряд существенных недостатков, среди которых невысокие износостойкость и жаропрочность.

В зарубежной научно-технической и патентной литературе широко освещается вопрос получения литьем с кристаллизацией под давлением биметаллических поршней для двигателей внутреннего сгорания из поршневых алюминиевых и жаропрочных сплавов, а также биметаллических деталей, работающих в условиях активного износа. Перспективность этих исследований обусловлена значительным увеличением срока службы подобных деталей по сравнению с цельнолитыми из алюминиевых сплавов, выигрышем в весе по сравнению с поршнями, изготовленными целиком из жаропрочных материалов, и ужесточением режимов эксплуатации. Опыт получения таких деталей в нашей стране должного распространения не получил.

Факторами, сдерживающими применение биметаллических деталей, является отсутствие достаточно прочных, износостойких, жаропрочных, сравнительно легких и доступных материалов, а также трудности, возникающие при попытках соединить подобные материалы с алюминиевыми сплавами. Этим требованиям, наряду с высокими механическими свойствами, отвечают композиционные материалы на алюминиевой основе, в частности, механически легированные дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ), но они значительно дороже литейных сплавов. Кроме того, они не технологичны при изготовлении деталей сложной конфигурации, которые могут быть получены только различными видами механической обработки со значительными объемами удаляемого материала.

Отсюда следует вывод, что возможности ДУКМ могут быть реализованы применением различного вида вставок или вкладышей из ДУКМ при получении биметаллических отливок литым с кристаллизацией под давлением. В качестве материала вкладышей был использован ДУКМ системы Al-Al₂O₃-Al₄C₃.

С целью проверки возможности получения биметаллических отливок литьем с кристаллизацией под давлением с вкладышами из ДУКМ был проведен ряд экспериментов на установке, показанной на рис. 1.

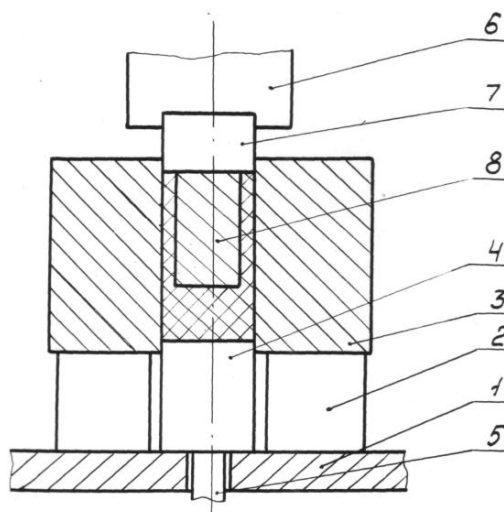


Рис. 1. Принципиальная схема установки:

1 – монтажная плита; 2 – опора; 3 – матрица; 4 – поршень; 5 – шток;
6 – держатель; 7 – оправка; 8 – вставка

Установка состоит из гидропресса марки ДГ-2428 усилием 63 тс и пресс-формы, смонтированной на столе гидропресса. Пресс-форма представляет собой следующее. На монтажной плите 1 с помощью жестких опор 2 установлена матрица 3, дно которой образовано поршнем 4, накрутым на шток 5 нижнего цилиндра гидропресса. К верхней траверсе гидропресса прикреплен держатель 6, предназначенный для фиксации оправки 7 со вставкой 8 из ДУКМ, которая играет роль пуансона.

Технология получения биметаллических образцов состоит в следующем. Из прутков ДУКМ изготавливали вставки диаметром 30 мм, длиной 50 мм и с резьбой для крепления к оправке. Вставки из ДУКМ требуемых размеров механически обрабатывали для снятия остатков плакирующего слоя, подвергали дробеструйной обработке, закрепляли в оправках и обезжировали. Затем вставки с оправками помещали в муфельную печь, где подвергали нагреву до температур 380-500°С, которые выбирали на основе анализа рекомендаций по получению биметаллических отливок на алюминиевой основе.

Параллельно этим операциям велась плавка в индукционной печи алюминиевого сплава АК12М2МгН и нагрев оснастки до рабочей температуры, которая находилась в пределах 250-280°С. В качестве контрольных образцов использовали вставки из литейного сплава АК12 с геометрией и подготовкой, идентичной обработке вставок из ДУКМ.

После нагрева вставок и оснастки в матрицу пресс-формы заливалась порция жидкого сплава АК12М2МгН, при этом температура сплава в печи выдерживалась в пределах 720-750°С, что позволяло обеспечивать температуру жидкого сплава в матрице к моменту ввертывания вставки в пределах 550-570°С. Такой интервал температур был выбран с целью сведения к минимуму вероятность потери свойств ДУКМ, которая происходит при температурах (0,85-0,95) $T_{пл}$ алюминиевой основы. Во избежание значительных потерь температуры жидким металлом прессование производилось со скоростью 40 мм/с, что позволяло прикладывать давление к жидкому металлу в минимально возможный промежуток времени.

После заливки порции жидкого сплава верхняя траверса гидропресса включалась на

движение вниз, при этом вставка 8 внедрялась в жидкий расплав, а оправка 7 перекрывала рабочую полость матрицы 3, и расплав, поднимаясь вверх, охватывал вставку под давлением, образуя биметаллическую заготовку. После выдержки под давлением 125 МПа до полного затвердевания расплава верхняя траверса, перемещаясь вверх, освобождала оправку, а нижний цилиндр гидропресса поршнем 4 выталкивал биметаллическую заготовку вместе с оправкой из матрицы.

В результате благоприятных температурных условий формирования биметаллической заготовки, тщательного подбора компонентов биметаллической пары и обеспечения плотного контакта между АК12М2МгН и ДУКМ за счет высокого давления оказалось возможным получение достаточно качественного соединения, что подтвердили механические испытания полученных образцов на растяжение, показавшие рост прочности биметаллического соединения с ростом температур нагрева вставки и расплава. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Группа образцов	Способ получения	T°, C (АК12М2МгН)	T°, C (ДУКМ)	P, MPa	σ_B, MPa
4-0	ЛКД	550	450	125	154,0
4-2	ЛКД	560	450	125	104,0
4-4	ЛКД	560	450	125	178,0
8-4	ЛКД	580	350	125	172,0
7	Кокиль	560	450	-	188,0
1-4	ЛКД	560	400	125	119,0

Во всех образцах разрушение происходило по наименее прочному компоненту биметалла, в частности, по АК12М2МгН, а не по переходному слою между компонентами. Контрольные образцы (все без исключения) разрушались по переходному слою. Кроме испытаний на растяжение, были проведены испытания кольцеобразных образцов, вырезанных из полученных биметаллических заготовок на выпрессовку в виде шайб из ДУКМ и АК12, охваченных сплавом АК12М2МгН. Результаты испытаний на выпрессовку приведены в табл. 2, и позволяют косвенно судить о прочности биметаллического соединения, поскольку коэффициент линейного термического расширения ДУКМ, использовавшегося в опытах, выше, чем у АК12М2МгН ($K_{ЛТР} = 20,5 \cdot 10^{-6} 1/град$). Данные по $K_{ЛТР}$ брались для всех материалов при температуре 300°C. Высокие показатели испытаний на выпрессовку у образцов из АК12, охваченных АК12М2МгН, объясняются более высоким $K_{ЛТР}$ у АК12, что приводит к механическому «заклиниванию».

Таблица 2

№ группы образцов	Материал вставки	$K_{ЛТР}$ вставки, $\times 10^{-6} 1/град$	T металла в матрице, °C	T вставки, °C	Скорость нагружения, мм/мин	Разрушающее напряжение среза, МПа
1	ДУКМ	21,0	560	430	2	61,4
2	ДУКМ	21,0	590	400	2	75,4
3	ДУКМ	21,0	600	500	2	87,3
4	АК12	23,3	570	300	2	92,8
5	АК12	23,3	580	350	2	49,6
6	АК12	23,3	560	450	2	65,6

Для качественной оценки биметаллического соединения были проведены металло-

графические исследования и измерения микротвердости. Металлографический анализ исследуемых образцов проводили на оптическом микроскопе «Неофет-30», а измерения микротвердости вблизи границы раздела на микротвердомере ПМГ-3 при нагрузках 50 и 100 г. Исследования распределения микротвердости проводили по обе стороны раздела биметалла, причем волокна ДУКМ расположены вдоль оси образца. Установлено значительное изменение микротвердости вблизи границы раздела на расстоянии порядка десятой доли миллиметра от места соединения. Значения микротвердости H_{μ} исследуемых образцов в зависимости от направления вырезки темплета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Обозначение материала	Направление вырезки темплета	H_{μ} , МПа		
		ДУКМ	AK12M2MgH	AK12
ДУКМ- AK12M2MgH	Продольное	164	136	-
ДУКМ- AK12M2MgH	Продольное	169	129	-
ДУКМ- AK12M2MgH	Продольное	-	138	106

На основании проведенных металлографических исследований показано, что в месте соединения двух материалов хорошо видна граница их раздела, по которой и вблизи ее расщелений и микротрещин не наблюдается. Структура ДУКМ плавно переходит в структуру AK12M2MgH (рис. 2). Ширина переходной зоны колеблется в пределах 0,1–0,2 мм. При ширине более 0,1 мм разрушение происходит исключительно по литому металлу.

С целью исследования переходной зоны биметаллического соединения был проведен микрорентгеноспектральный анализ по элементам. Не определялось содержание С и Mg (вследствие наложения спектральных линий Mg и Al и отсутствия в AK12M2MgH углерода). Сплав AK12M2MgH с известным химическим составом взят в качестве эталона. Состав переходной зоны полученной биметаллической заготовки приведен в табл. 4.

Таблица 4

Элементы	AK12M2MgH	Переходная зона	ДУКМ
Si	11,70	11,30	0
Ni	1,10	0,90	0
Vn	0,45	0,20	0
Cu	2,20	-	-
Mg	1,10	-	-
Fe	0,80	0,60	0,40

Без учета содержания Mg и Cu состав переходной зоны близок по составу к сплаву AK12M2MgH. Несколько меньшее содержание легирующих элементов (Si, Ni, Mn) и примесь (Fe) в переходной зоне является следствием взаимного проникновения сплава AK12M2MgH и подплавленного слоя ДУКМ.

Результаты исследований позволили разработать технологию ЛКД для получения биметаллических отливок поршней для двигателей внутреннего сгорания, роликов и шкивов мотальных машин. На рис. 3 приведен макрошлиф биметаллической отливки «шкив», где видна четкая границы между вставкой из ДУКМ и основной массой металла. Макрошлиф подтверждает правильность выбора технологии получения биметаллической отливки и составляющих компонентов.

Разработанная технология и полученные биметаллические отливки позволяют сделать вывод о перспективности применения биметаллов с ДУКМ на алюминиевой основе.

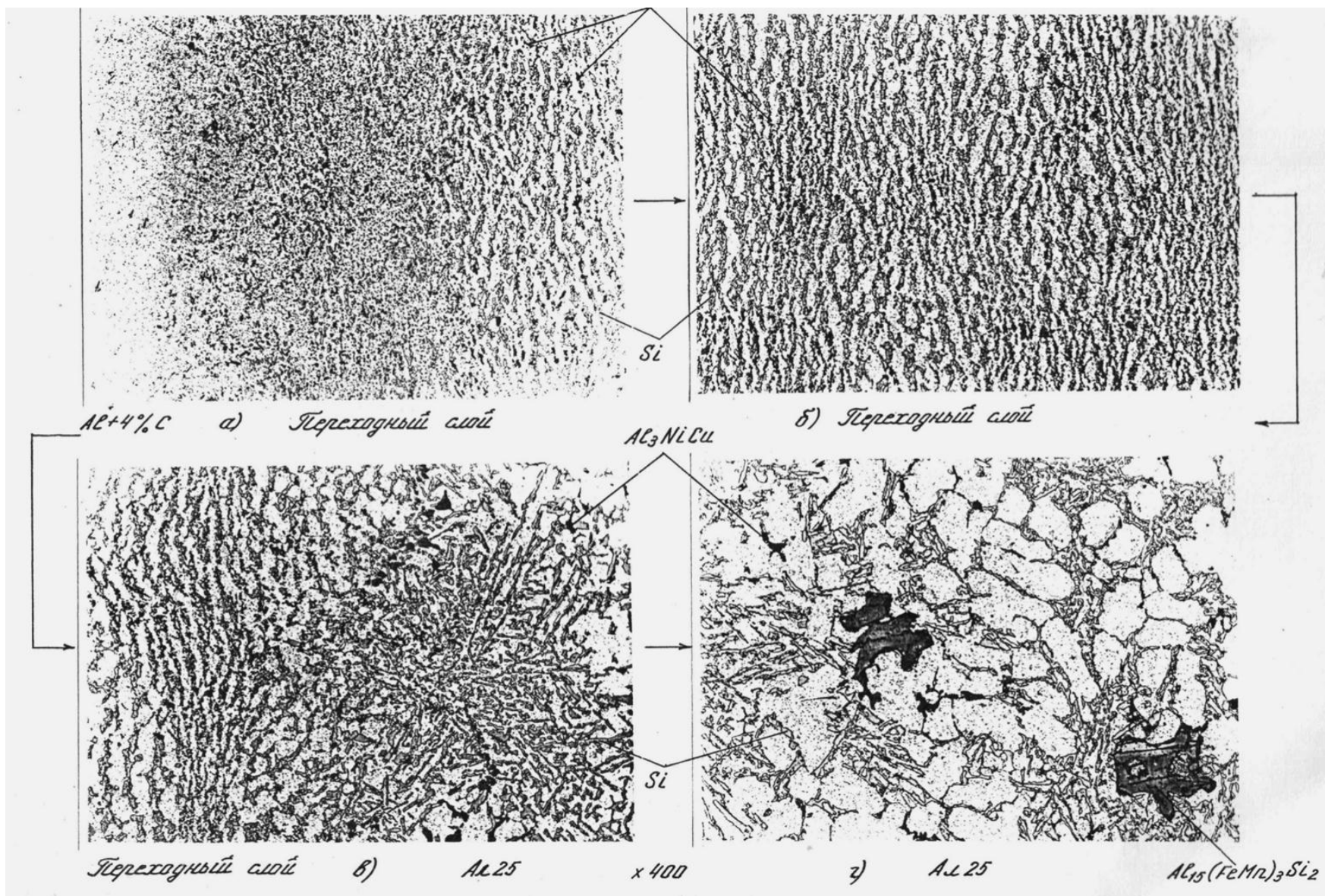


Рис. 2. Структура переходного слоя (ДУКМ- АК12М2МгН)

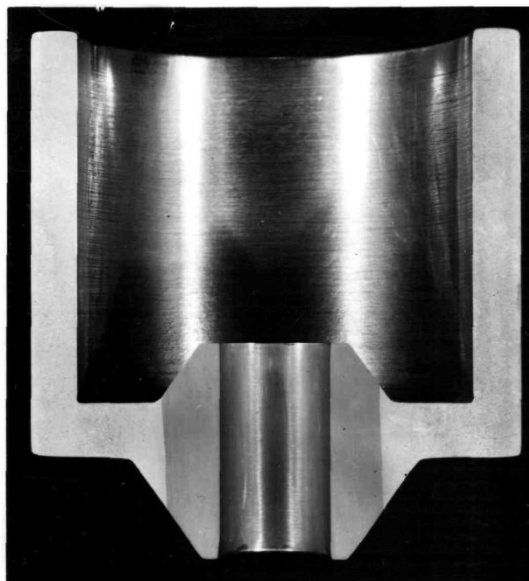


Рис. 3. Макрошлиф детали «шквив»

Библиографический список

1. Штамповка жидкого металла / А.И. Батышев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 200 с.
2. Основы процессов получения биметаллических отливок. – Киев, 1990. – 20 с.
3. **Батышев, А.И.** Литье с кристаллизацией под давлением сплавов цветных металлов / А.И. Батышев, В.И. Безпалько. – М.: ЦНИИТЭИ. 1985. – 48 с.
4. **Зарапин, Ю.Л.** Производство композиционных материалов обработкой давлением / Ю.Л. Зарапин, Н.А. Чиченев, Н.Г. Чернилевская. – М.: Metallurgia. 1991. – 350 с.
5. **Мусин, Р.А.** Соединение металлов с керамическими материалами / Р.А. Мусин, Г.В. Конюшков. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
6. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
7. **Белявский, Г.И.** Получение биметаллических деталей с вкладышами из дисперсионно-упрочненных порошковых композитов / Г.И. Белявский, Е.П. Шалунов, М.А. Шведов // 8-я международная конференция по порошковой металлургии в ЧСФР. 1992.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

G.I. Beliavsky, S.V. Kuznetsov, Yu.A. Zinoviev, V.D. Shvetsov

PRESSURE CRYSTALLIZATION FOR BIMETAL CASTINGS MANUFACTURING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Production of bimetal castings that help to prolong machine components life.

Methodology: Usage of pressure crystallization for casting process, where inserts of dispersion-strengthened compound material, and of various geometries, are imbedded into supernatant liquid.

Findings: The mechanical and metallographic examinations showed that the transition layer between the dispersion-strengthened compound material and the casting alloy has a smooth transition, and the destruction resulted from mechanical tests affects the cast material.

Originality/value: The results of the investigation helped to obtain test parts (pistons and rolls), as well as to form a conclusion considering the highly perspective usage of dispersion-strengthened compound materials as casting inserts.

Key words: casting with crystallization under pressure, the bimetallic casting, particulate-reinforced composite material.

УДК 620.178.3+620.194.8

А.Н. Гуцин¹, Ю.Б. Гусев², С.В. Созинов³**ПОВЕДЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
ОАО «ГАЗ»²,
Волжская государственная академия водного транспорта³

Проведены комплексные исследования изменения механических характеристик при статическом и циклическом нагружении предварительно деформированной растяжением малоуглеродистой стали 20. Установлены закономерности изменения механических характеристик, а также длительности периодов усталостного разрушения от степени предварительной деформации.

Ключевые слова: деформация, усталость, циклические повреждения, прочность, пластичность, периоды разрушения, упрочнение.

Элементы изделий при изготовлении и эксплуатации подвергаются различным видам и степеням деформации. Влияние степени и вида деформации на механические характеристики, особенно на параметры усталостного разрушения материалов, изучены недостаточно, а сведения литературных источников весьма ограничены и противоречивы. Поэтому исследования по прогнозированию, повышению долговечности и снижению металлоемкости изделий на основании установления изменения механических характеристик и закономерностей усталостного разрушения предварительно деформированных металлических материалов являются весьма актуальными.

Методика работы

Образцы для проведения исследований изготавливались из гнутых замкнутых сварных профилей стали 20 размером 80×80×3 мм (ГОСТ 30245-2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные»). Предварительной пластической деформации ($\varepsilon_{п.д.}$) в диапазоне от 0 до 18 % (до предельной равномерной деформации) подвергались пластины с размерами поперечного сечения 3×20 мм, из которых изготавливались образцы как для статических испытаний на растяжение (сечением 3×3 мм при выполнении указанного в ГОСТе 1407-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» соотношения $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$ между начальной расчетной длиной образца l_0 и площадью поперечного сечения A_0), так и для усталостных испытаний (размеры рабочей части соответствовали IV типу плоских образцов, согласно ГОСТ 25.502 – 79 «Методы испытаний на усталость»). Статические испытания и предварительное деформирование растяжением проводились на разрывной машине INSTRON со скоростью деформации $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Усталостные испытания осуществлялись по схеме мягкого нагружения знакопеременным циклическим изгибом на установке, позволяющей регистрировать изменения прогиба образца в процессе нагружения [1]. По результатам статических испытаний, помимо стандартных механических испытаний (σ_B - предел прочности, $\sigma_{0,2}$ - предел текучести, δ - полное относительное удлинение), определялся показатель деформационного упрочнения n из уравнения кривой упрочнения при статическом растяжении [1, 2]:

$$\sigma_i = \sigma_0 \varepsilon_i^n, \quad (1)$$

где σ_i - истинное текущее напряжение течения; ε_i - истинная текущая деформация; σ_0 - постоянная, равная напряжению течения при $\varepsilon = 1$.

С позиций оценки накопления циклических повреждений кинематические диаграммы усталостного разрушения представлялись как изменение относительной величины прогиба образца (f_i) в функции числа циклов перемены напряжений (N). При заданном уровне циклического напряжения относительная стрела прогиба образца определялась как

$$\varepsilon_{с.п} = \frac{f_i}{f_0}, \quad (2)$$

где f_0, f_i – соответственно величины начальной и текущей стрелы прогиба образца в функции N числа циклов нагружений. Кинетические диаграммы усталостного разрушения представлялись в координатах $\lg \varepsilon_{п.д} - \lg N$, по которым проводилась количественная оценка длительности стадий усталостного разрушения – стадии N_1 (до момента раскрытия и распространения усталостной трещины), и стадии $N_{тр}$ распространения усталостной трещины (с момента раскрытия трещины до полного её распространения по сечению образца).

Результаты исследований

Результаты испытаний на статическое растяжение предварительно деформированных образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики образцов в зависимости от $\varepsilon_{п.д}$

Механические характеристики	Степень предварительной деформации $\varepsilon_{п.д}$, %					
	0	2,5	5	10	15	18
σ_B , МПа	436	454	464	490	515	520
$\sigma_{0,2}$, МПа	322	364	390	425	446	460
δ , %	24,5	22,3	20	14,2	10,5	8,5

Из табл. 1 видно, что пластическая деформация приводит к упрочнению стали, т.е. к росту прочностных и снижению пластических характеристик. Предел прочности σ_B и предел текучести $\sigma_{0,2}$ соответственно возрастают в 1,19 и в 1,43 раза, а полное относительное удлинение δ снижается в 2,9 раза. При этом эффект упрочнения наиболее полно оценивается показателем деформационного упрочнения n . Показатель n является структурно-чувствительной характеристикой материалов: он зависит от типа кристаллической решетки (у сплавов с ГЦК решеткой его величина обычно выше, чем у сплавов с ОЦК и ГПУ решетками), от содержания примесей и легирующих элементов, а также от предшествующей обработки при выплавке, пластической деформации и термической обработке. Показатель деформационного упрочнения n с увеличением прочности сплава, как правило, уменьшается. Кривые упрочнения, представленные в логарифмических координатах $\lg \sigma_i - \lg \varepsilon_i$, и изменение показателя n в функции степени предварительной деформации приведены на рис. 1. Уравнения кривых упрочнения, выведенные методом корреляционного анализа, имеют общий вид

$$\lg \sigma_i = \lg \sigma_0 + n \lg \varepsilon_i. \quad (3)$$

Параметры этих уравнений и величина показателя n в зависимости от степени предварительной деформации $\varepsilon_{п.д}$ представлены в табл. 2. Из рис. 1 и табл. 2 видно, что с ростом степени предварительной деформации $\varepsilon_{п.д}$ кривые деформационного упрочнения располагаются выше, а величина структурно – чувствительного показателя n монотонно снижается – с увеличением $\varepsilon_{п.д}$ от 0 до 18% показатель деформационного упрочнения n снижается в 7,3 раза. Таким образом, предварительная пластическая деформация растяжением приводит к

росту прочностных, падению пластических характеристик и снижению деформационной способности исследуемых образцов.

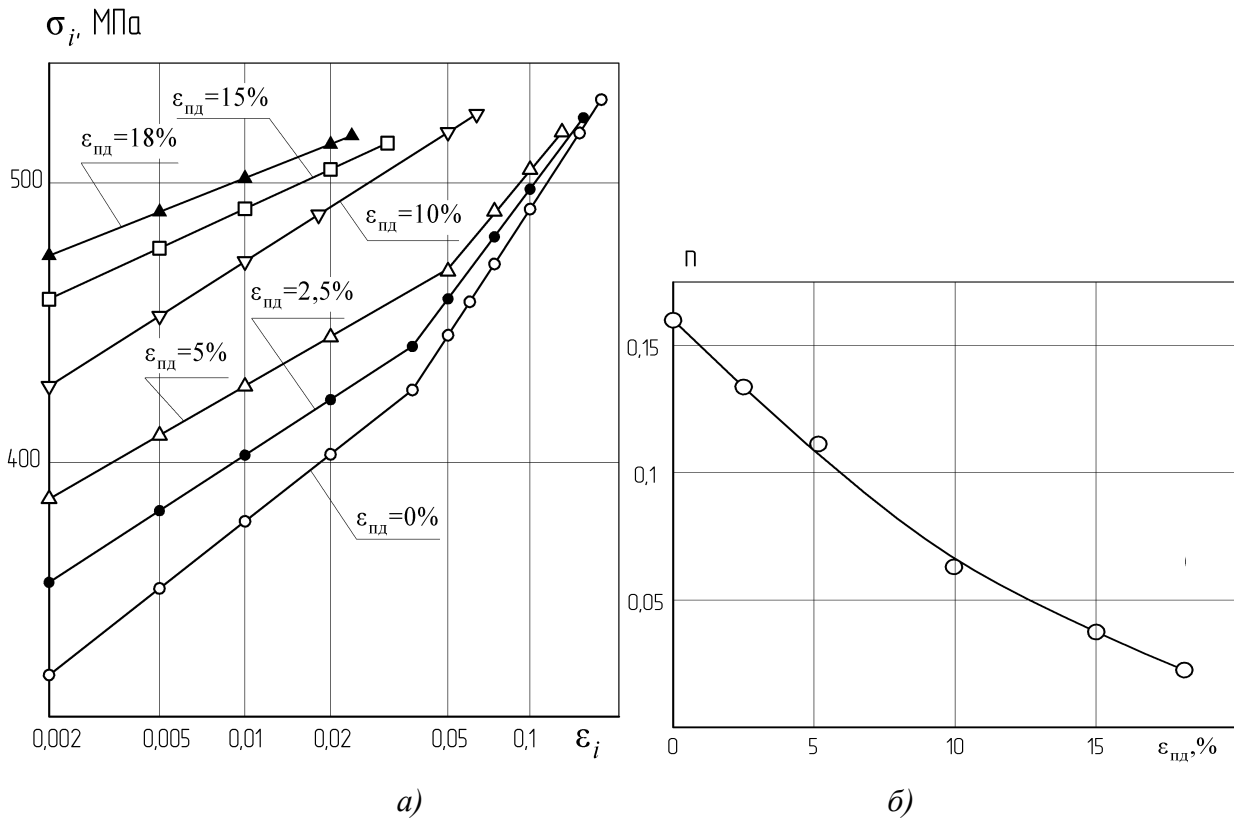


Рис. 1. Кривые упрочнения (а) и изменение показателя деформационного упрочнения n (б) от степени предварительной деформации растяжением

Таблица 2

Параметры уравнений кривых упрочнения и показатель n от $\epsilon_{п.д.}$

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д.}, \%$					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \sigma_0$	2,582	2,829	2,818	2,798	2,768	2,737
n	0,161	0,135	0,114	0,061	0,041	0,022
r	0,982	0,978	0,987	0,989	0,992	0,988

Примечание: r - коэффициент корреляции.

Предварительная пластическая деформация, упрочняя металлические материалы, неоднозначно влияет на их усталостные характеристики [1, 2]. Сопротивление циклическим нагрузкам (сопротивление усталости) определяется комплексом действующих внешних и внутренних факторов. Между прочностными и пластическими характеристиками, определяемых при стандартных испытаниях на растяжение, и характеристиками сопротивления усталости существуют определенные корреляционные зависимости. При изготовлении многих металлоизделий в качестве формообразующей операции применяется холодная пластическая деформация, сопровождающаяся изменением микро- и субмикроструктуры, наклепом и накоплением повреждаемости. Во многих случаях прослеживается корреляция предела усталости и прочностных характеристик: повышение предела прочности, предела текучести (при легировании, термической обработке) приводит и к повышению предела усталости, в то же время снижение пластических характеристик может ухудшать усталостные характеристики,

к которым, кроме предела усталости, можно отнести и тангенсы углов наклона кривой усталости в координатах «амплитудное напряжение цикла – число циклов до разрушения». Холодная пластическая деформация повышает прочностные характеристики, но уменьшает пластические, а также и скорость деформационного упрочнения. Поэтому зависимости усталостных параметров от степени предварительной деформации немонотонны и неоднозначны. Кривые усталости строились в логарифмических координатах $\lg \sigma - \lg N$, уравнения которых имеют общий вид

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \beta \lg N, \tag{4}$$

где β - тангенс угла наклона кривой усталости, характеризующий интенсивность накопления циклических повреждений.

Параметры уравнений кривых усталости, а также величины пределов усталости σ_{-1} на базе испытаний $N = 10^7$ циклов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры уравнений кривых усталости и изменение σ_{-1} от $\epsilon_{п.д}$

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д}$, %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \sigma_0$	3,114	3,593	4,210	4,324	4,408	4,751
β	0,111	0,273	0,315	0,328	0,342	0,410
σ_{-1} , МПа	240	200	215	235	240	225
r	- 0,985	- 0,984	- 0,979	- 0,968	- 0,974	- 0,968

Примечание: r – коэффициент корреляции.

На рис. 2 показаны зависимости изменения σ_{-1} и показателя β в функции степени предварительной деформации $\epsilon_{п.д}$. Из рис. 2 видно, что зависимости изменения показателя β , характеризующего интенсивность накопления циклических повреждений, и предела усталости σ_{-1} на базе испытаний $N = 10^7$ циклов от степени предварительной деформации $\epsilon_{п.д}$ можно разделить на три участка: первый участок $\epsilon_{п.д}$ изменяется от 0 до 5%; второй – $\epsilon_{п.д}$ изменяется от 5 до 15%, третий участок $\epsilon_{п.д} > 15\%$.

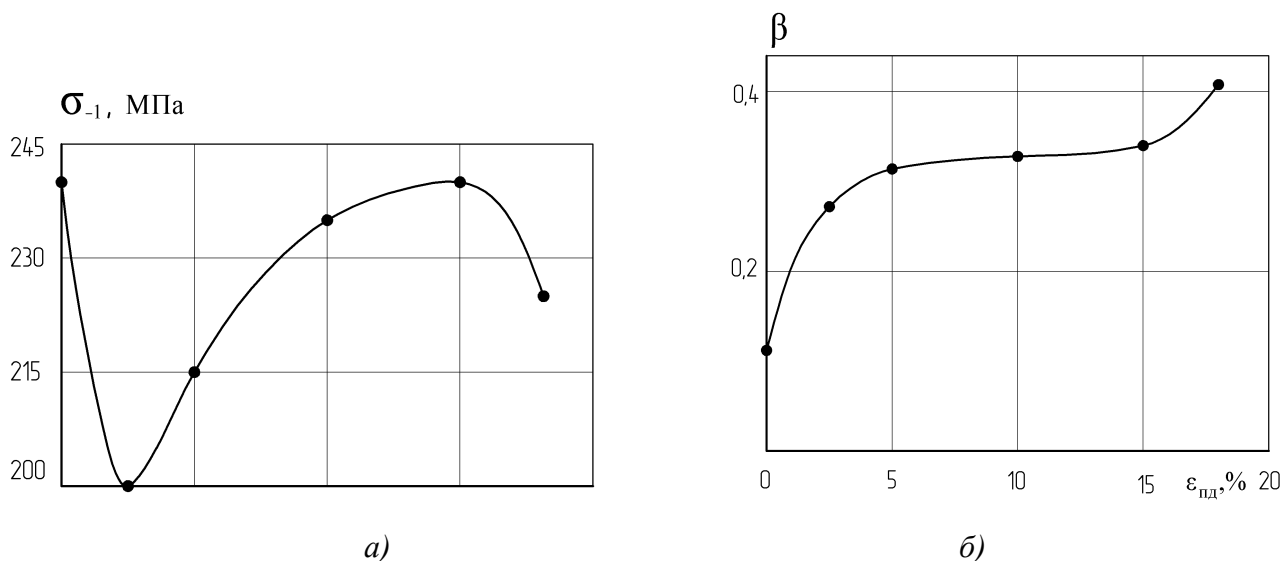


Рис. 2. Изменение предела усталости σ_{-1} (а) и показателя β (б) в зависимости от $\epsilon_{п.д}$

Первый участок характеризуется резким увеличением показателя β , величина которого $\beta = 0,315$ при $\varepsilon_{п.д.} = 5\%$ в 2,84 раза выше, чем у недеформированных образцов, и снижением предела усталости до минимума $\sigma_{-1} = 200$ МПа при $\varepsilon_{п.д.} = 2,5\%$ (по сравнению с недеформированными образцами σ_{-1} снижается на 20%), что может быть связано с возникновением повреждаемости в наиболее слабых поверхностных зернах металла, с характером и уровнем внутренних остаточных напряжений, степенью неоднородности пластической деформации [1, 2].

На втором участке рост показателя β существенно замедляется (при $\varepsilon_{п.д.} = 15\%$ $\beta = 0,342$, то есть на 8,6% больше, чем у образцов, деформированных на $\varepsilon_{п.д.} = 5\%$), а предел усталости непрерывно возрастает и при $\varepsilon_{п.д.} = 15\%$ достигает максимума $\sigma_{-1} = 240$ МПа, что соответствует пределу усталости недеформированных образцов.

Падение σ_{-1} до 225 МПа и дальнейший рост показателя β до 0,41 при $\varepsilon_{п.д.} = 18\%$ предопределяет ухудшение усталостных характеристик на третьем участке, которое очевидно обусловлено возникновением в процессе пластического деформирования растяжения дефектной структуры, когда в локальных объемах металла с критической плотностью дислокаций зарождаются субмикроскопические трещины, инициирующие при циклическом нагружении развитие микропластических деформаций и снижающие сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин [3].

При этом следует отметить, что с увеличением $\varepsilon_{п.д.}$ уменьшение показателя деформационного упрочнения n удовлетворительно согласуется с ростом показателя β кривых усталости, то есть снижению деформационной способности предварительно деформированных образцов соответствует рост интенсивности накопления усталостных повреждений с уменьшением амплитуд напряжений цикла σ_a .

Кроме построения кривых усталости с определением предела усталости σ_{-1} и показателя интенсивности накопления усталостных повреждений β , важную дополнительную информацию о накоплении циклических повреждений с оценкой длительности распространения усталостной трещины можно получить при рассмотрении изменения стрелы прогиба образца $\varepsilon_{с.п.} = f_i/f_0$, где f_0, f_i – соответственно величины начальной и текущей стрелы прогиба образца, в функции N числа циклов нагружений.

На рис. 3 в координатах $\lg \varepsilon_{с.п.} - \lg N$ представлены кривые $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$ при амплитудном напряжении цикла 300 МПа. Из рис. 3 видно, что процесс усталостного разрушения можно разделить на две стадии: стадию N_1 (до момента раскрытия и распространения усталостной трещины), которой соответствует пологий участок кривой $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$, и стадию $N_{тр}$ распространения усталостной трещины (с момента раскрытия трещины до полного её распространения по сечению образца), которой соответствует крутой участок кривой $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$. При этом точке перегиба соответствует наведенная циклическим нагружением трещина, длина которой порядка 450 мкм.

Долговечность N до разрушения, как правило, определяется показателем C , характеризующим скорость накопления усталостных повреждений в первый период усталостного разрушения, величину которого можно определить из уравнения

$$\lg \varepsilon_{с.п.} = \lg \varepsilon_0 \pm C \lg N_1. \quad (5)$$

Параметры этого уравнения в зависимости от величины $\varepsilon_{п.д.}$ даны в табл. 4.

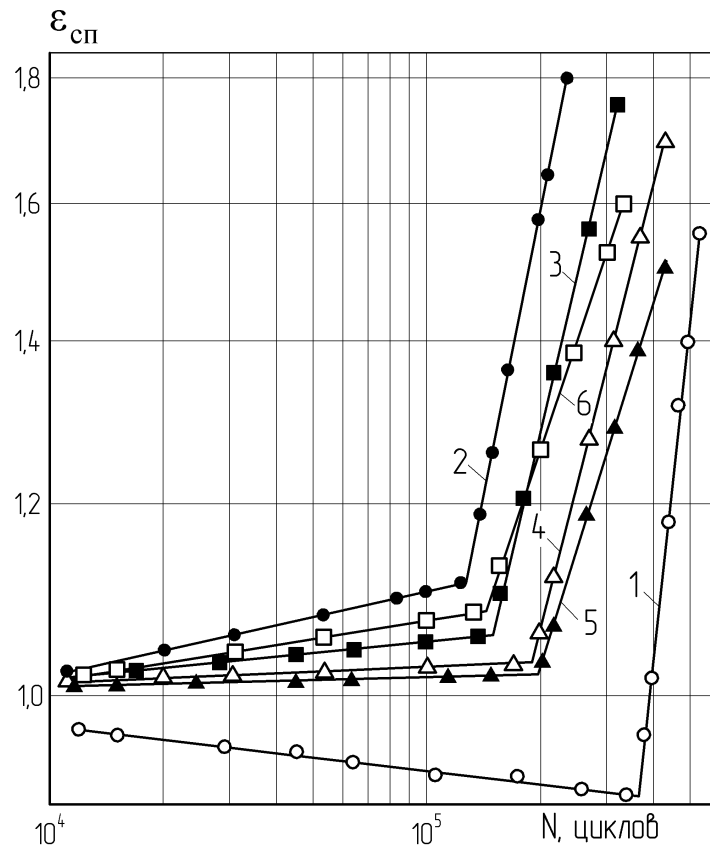


Рис. 3. Изменение стрелы прогиба образца при $\sigma_a = 300$ МПа в зависимости от степени предварительной деформации растяжением:

1 - $\epsilon_{пд} = 0$; 2 - $\epsilon_{пд} = 2,5\%$; 3 - $\epsilon_{пд} = 5\%$; 4 - $\epsilon_{пд} = 10\%$; 5 - $\epsilon_{пд} = 15\%$; 6 - $\epsilon_{пд} = 18\%$

Таблица 4

Параметры уравнений кривых прогиба на стадии N_1 при $\sigma_a = 300$ МПа

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д.}$, %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \epsilon_0$	0,0549	- 0,1299	- 0,0479	- 0,0247	- 0,0159	- 0,0915
C	- 0,0174	0,0346	0,0143	0,0073	0,0047	0,0243
r^*	- 0,985	0,976	0,967	0,981	0,968	0,973

Примечание: r – коэффициент корреляции.

Анализ результатов, представленных на рис. 3 и в табл. 4, показывает, что превалирующим процессом при циклическом нагружении недеформированных образцов является циклическое упрочнение ($\epsilon_{п.д} < 1$), показатель $C = - 0,0174$; $N=5,2 \cdot 10^5$ циклов. Предварительная пластическая деформация приводит к смене механизма, контролирующего скорость процесса усталости, так как упрочнение сменяется разупрочнением ($\epsilon_{п.д} > 1$). При этом следует отметить удовлетворительное соответствие способности упрочненной структуры к циклическому разупрочнению при $\sigma_B/\sigma_{0,2} < 1,2$ [3]. Долговечность при $\epsilon_{п.д} = 2,5\%$ снижается до $N=2,4 \cdot 10^5$ циклов при значении показателя $C = 0,0346$. Дальнейшее увеличение $\epsilon_{п.д.}$ от 5 до 15 % уменьшает показатель C , что соответствует увеличению долговечности предвари-

тельно деформированных образцов. Так, при $\varepsilon_{п.д} = 5\%$ ($C = 0,0143$) $N = 3,2 \cdot 10^5$ циклов, а при $\varepsilon_{п.д} = 15\%$ ($C = 0,0047$) $N = 4,45 \cdot 10^5$ циклов. Из рис. 3 видно, что долговечность недеформированных образцов в большей степени определяется длительностью стадии до момента образования усталостной трещины N_1 . С увеличением степени предварительной деформации $\varepsilon_{п.д}$ точка перегиба кривых прогиба смещается в область меньших долговечностей, что свидетельствует о снижении длительности стадии N_1 и предположении о том, что долговечность предварительно деформированных образцов определяется длительностью стадии распространения усталостной трещины по сечению образца.

Результаты обработки кинетических диаграмм усталостного разрушения $\varepsilon_{с.п} = f(N)$ с определением коэффициента $m = N_1/N$, определяющего относительную продолжительность стадий усталостного разрушения, представлены в табл. 5 и на рис. 4. Из табл. 5 и рис. 4 следует, что долговечность предварительно недеформированных образцов и деформированных на $\varepsilon_{п.д} = 2,5\%$ определяется длительностью стадии N_1 , которая от долговечности N составляет соответственно 69 и 54 %.

Таблица 5

Длительность стадий усталостного разрушения в зависимости от $\varepsilon_{п.д}$.

$\varepsilon_{п.д}, \%$	Число циклов $\cdot 10^5$ при $\sigma_a = 300$ МПа			m
	N	N_1	$N_{ТР}$	
0	5,25	3,65	1,6	0,69
2,5	2,4	1,3	1,1	0,54
5	3,1	1,48	1,62	0,48
10	4,18	1,9	2,28	0,45
15	4,45	1,96	2,49	0,44
18	3,4	1,45	1,95	0,42

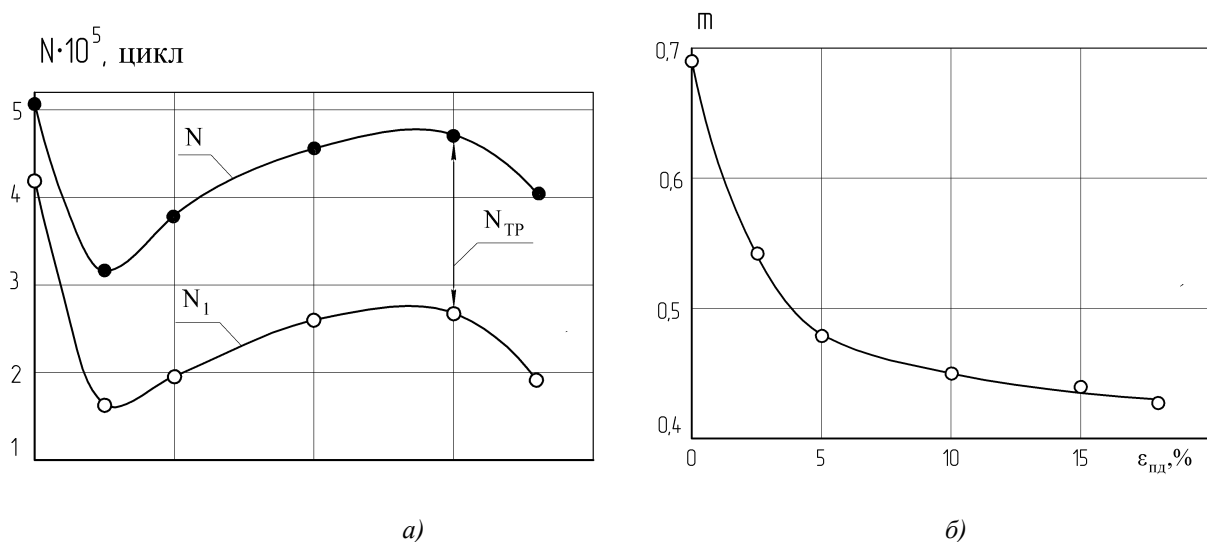


Рис. 4. Изменение длительности стадии усталостного разрушения (а) и показателя m (б) в зависимости от степени предварительной деформации растяжением:

N – число циклов до полного разрушения; N_1 – число циклов до момента образования усталостной трещины; $N_{ТР}$ – число циклов распространения усталостной трещины

При этом долговечности N , N_1 , и $N_{ТР}$ предварительно деформированных образцов на

$\varepsilon_{п.д} = 2,5\%$ ниже, чем недеформированных соответственно в 2,2; 2,8 и 1,45 раза. При $\varepsilon_{п.д} > 2,5\%$ долговечность предварительно деформированных образцов определяется длительностью распространения усталостной трещины по сечению образца, и при $\varepsilon_{п.д} = 18\%$ длительность стадии N_1 составляет всего 42% от полной долговечности образца до разрушения. С ростом степени предварительной деформации в интервале $2,5\% < \varepsilon_{п.д.} \leq 15\%$ происходит непрерывное одновременное увеличение долговечностей N , N_1 , и $N_{тр}$. По сравнению с $\varepsilon_{п.д.} = 2,5\%$ долговечности N , N_1 , и $N_{тр}$ при $\varepsilon_{п.д.} = 10 - 15\%$ возрастают соответственно в 1,74 - 1,85; 1,46 - 1,51 и 2,1 - 2,26 раза при $m = 0,45 - 0,44$. Очевидно, что степени деформации, соответствующие верхним пределам указанного интервала ($\varepsilon_{п.д.} = 10-15\%$) являются оптимальными с позиций повышения долговечности методами холодного пластического деформирования растяжением. Увеличение степени пластической деформации выше указанного интервала снижает долговечности N , N_1 , и $N_{тр}$. В последнем случае усталостная трещина возникает на ранних стадиях циклического деформирования и длительность распространения ее по сечению образца составляет порядка 60% его долговечности. Следует отметить, что превалирование длительности стадии распространения усталостной трещины в предварительно деформированных образцах связано с наличием в их структуре дефектов дислокационного характера, таких как границы субзерен, плотность дислокаций, полосы скольжения, внесенные пластической деформацией растяжения.

Выводы

1. Установлены закономерности изменения стандартных механических характеристик (прочностных и пластических) и показателя деформационного упрочнения от степени предварительного пластического деформирования растяжением $\varepsilon_{п.д.}$.

2. Построены кривые усталости на базе испытаний $N = 10^7$ циклов, на основании которых выявлено неоднозначное изменение предела усталости σ_{-1} и показателя интенсивности накопления циклических повреждений β . Зависимости изменения σ_{-1} и β в функции $\varepsilon_{п.д.}$ соответствуют трем характерным участкам, на каждом из которых поведение σ_{-1} и β определяется структурным состоянием предварительно деформированных образцов.

3. Установлены закономерности изменения длительности периодов усталостного разрушения (циклического деформирования до момента раскрытия и распространения усталостной трещины N_1 и с момента раскрытия усталостной трещины до полного ее распространения по сечению образца $N_{тр}$) в зависимости от степени предварительной пластической деформации растяжением $\varepsilon_{п.д.}$. Показано, что долговечность предварительно деформированных образцов при $\varepsilon_{п.д.} > 5\%$ в большей степени определяется длительностью стадии распространения усталостной трещины $N_{тр}$. Продолжительность стадии распространения усталостной трещины растет с увеличением степени предварительной деформации и при $\varepsilon_{п.д.} = 18\%$ и составляет порядка 60% от полной долговечности образца N .

Библиографический список

1. **Пачурин, Г.В.** Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в различных условиях нагружения / Г.В. Пачурин, А.Н.Гущин. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 138 с.

2. **Пачурин, Г.В.** Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий / Г.В. Пачурин, А.Н. Гущин; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 173 с.
3. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2002. – 287 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

A.N. Guschin¹, Y.B. Gusev², S.V. Sozinov³

BEHAVIOR OF LOW CARBON STEEL PREVIOUSLY DEFORMED UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «GAZ»²,
Volga state academy of water transport³

Purpose: To establish patterns of change in mechanical properties under static loading and fatigue fracture parameters on the rate of preliminary plastic deformation by stretching.

Methodology: Experimental and analytical research methods are used.

Results: The patterns of changes in the mechanical characteristics under static loading and fatigue fracture parameters on the rate of pre-tensile strain have been installed.

Key words: deformation, fatigue, cyclic damage, strength, plasticity, periods of destruction, hardening.

УДК 621.9.02-229

В.П. Хранилов, Е.В. Тесленко, В.В. Андреев

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ В САПР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: выявление связи предлагаемой информационной модели формирования массива конструктивно-технологических параметров детали с моделями функционирования динамических систем автоматического управления.

Методология/подход: системный анализ особенностей применения предлагаемой модели, на основе признаков, характерных для динамических систем.

Результаты: проведенный анализ динамической модели при проектировании дает возможность определить предлагаемую математическую модель как структурно-параметрическую модель в пространстве состояний.

Применение: разрабатываемая динамическая модель позволяет описывать процесс формирования конструктивно-технологических параметров при проектировании детали.

Оригинальность/значение: определение разрабатываемой модели как структурно-параметрической модели в пространстве состояний позволяет выработать общую терминологию, единый универсальный математический аппарат и выявить общие закономерности и единство в разнообразных приложениях.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, математическая модель, агрегат, конструктивно-технологические параметры деталей.

Внедрение технологий интегрированной поддержки жизненного цикла продуктов (ИПИ-технологий) активно проводится в передовых отраслях Российской Федерации (авиационная, атомная, машиностроение). На ряде предприятий этих отраслей внедрение находится не на начальной стадии, а далеко продвинуто за этап проектирования. Остро стоит вопрос реализации сквозного цикла проектирование/конечно-элементный анализ конструкции (CAD/CAE) и проектирование/изготовление с использованием станков с ЧПУ (CAD/CAM), проектирование/технологическая подготовка производства (CAD/CAPP).

Конкуренция на рынке изделий машиностроения, сопровождающаяся их усложнением и ростом номенклатуры, требует сокращения длительности конструкторско-технологической подготовки производства. Можно условно сказать, что в разработке и согласовании конструкторской документации взаимодействуют системы «конструктор», «технолог», «метролог».

Для успешного решения задачи управления конструкторско-технологическим взаимодействием систем «конструктор», «технолог», «метролог» при автоматизированном проектировании важен выбор математической модели, используемой в качестве основы алгоритма принятия решения.

При моделировании процесса управления массивом конструкторско-технологических параметров в условиях наличия вариантов в качестве основы предлагается использовать теоретико-множественную модель детали как объекта проектирования [1-3]:

$$\{\mathbf{P}\} = \Phi[\{\mathbf{X}\}, \{\mathbf{Z}\}, \{\mathbf{V}\}] \quad (1)$$

Выражение (1) задает описание способа преобразования параметров детали, заданных совокупностью описаний множества ее поверхностей, с целью исследования модели на предмет выявления в ней возможностей введения элементов автоматического управления, способных реализовать в формализованном виде процедуры автоматизированного проектирования для САПР. При таком подходе проектируемую систему можно представить в виде агрегата [4, 5, 6]

$$\Sigma = [\mathbf{T}, \{\mathbf{X}\}, \{\mathbf{Z}\}, \{\mathbf{V}\}, \{\mathbf{\Omega}\}, \{\mathbf{Y}\}, \{\mathbf{\Gamma}\}, \mathbf{H}, \mathbf{G}], \quad (2)$$

где \mathbf{T} – множество моментов времени; $\{\mathbf{X}\}$ – множество мгновенных значений входных воздействий; $\{\mathbf{Z}\}$ – множество технико-экономических требований, установленных техническим заданием; $\{\mathbf{V}\}$ – множество внешних факторов; $\{\mathbf{\Omega}\}$ – множество допустимых входных

воздействий; $\{Y\}$ – множество мгновенных значений выходных воздействий; $\{G\}$ – множество допустимых выходных воздействий; H – оператор переходов, устанавливающий функциональную связь между переменными; G – оператор, устанавливающий связь между состоянием системы и ее выходной величиной, предопределяющей множество G .

Такая кибернетическая модель определяет проектируемую систему как «черный ящик», имеющий входы, выходы и внутреннюю конструкцию.

Наличие в модели множества моментов времени T при условии их дискретности позволяет использовать терминологию и математический аппарат теории конечных автоматов [6]. Введение дискретных отсчетов времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ не имеет цели отображения процессов функционирования проектируемой вычислительной системы во времени, а используется для фиксации сложившихся в процессе целенаправленных интерактивных воздействий различных состояний системы. Далее отмеченные дискретные отсчеты времени целесообразно обозначить в виде целых неотрицательных чисел и называть тактами [6]. Множество дискретных состояний системы, представляющее множество вариантов назначения массива параметров детали со своими фиксированными наборами значений параметров, обозначим как $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Наличие множества решений, вызванное вариациями массива параметров деталей в процессе проектирования, изменением вектора требований к конструкции $\{Z\}$, а также определяемое наличием управляющих воздействий со стороны ЛПП определяет факторы неопределенности принятия проектных решений при ее проектировании.

Учитывая особенности конструкторско-технологических стадий создания проекта детали, необходимо заметить, что реализация этих этапов, как правило, предусматривает выбор параметров формирующих ее геометрических поверхностей. В этом случае исходная обобщенная математическая модель трансформируется.

Исходные множества $\{U\}$, $\{\Omega\}$ отображают не входные воздействия, а управляющие воздействия ЛПП, то есть $\{U\}$ – множество мгновенных значений управляющих воздействий $\{U\} = \{X\} \cup \{Z\}$ и $\{\Omega\}$ – допустимые значения векторов $\{X\}$ и $\{Z\}$, то есть $\{\Omega\} = \{X\}_{\text{доп.}} \cup \{Z\}_{\text{доп.}}$. Множество $\{G\}$ представляется множеством ограничений на конструктивно-технологические параметры детали $\{P\}_{\text{доп.}}$; $\{G\} = \{P\}_{\text{доп.}}$. Множество $\{Y\}$ в (2) представлено множеством $\{P\}$ (1). Вводится $\{S\}$ – множество состояний системы, интегрирующее мгновенные значения векторов $\{U\}$ и $\{V\}$. Оператор G , устанавливающий связь между состояниями системы $\{S\}$ и конструктивно-технологическими параметрами детали $\{P\}$, определяется функционалом Φ , выражающим теоретико-множественное соответствие

$\{q\} = [\{X\}, \{Z\}, \{V\}, \{P\}, \Phi]$ с учетом определения разных способов осуществления этого соответствия в виде процедур, реализующих зависимости $P_i = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$. Оператор H , устанавливающий функциональную связь между переменными, в дальнейшем определяется с использованием либо регрессионных зависимостей, либо при помощи моделей, построенных на основе искусственных нейронных сетей.

Таким образом, с учетом наличия управляющих воздействий со стороны ЛПП имеем модель

$$\Sigma = [T, \{S\}, \{U\}, \{\Omega\}, \{P\}, \{G\}, \{V\}, H, \Phi]. \quad (3)$$

В развернутом виде с учетом приведенных преобразований:

$$\Sigma = [T, \{S\}, \{X\}, \{Z\}, \{\Omega\}, \{P\}, \{G\}, \{V\}, H, \Phi]. \quad (4)$$

Приведенный агрегат соответствует системе управления моделью формирования массива конструктивно-технологических параметров детали (рис. 1).

С целью описания множества дискретных состояний системы управления процессом формирования массива параметров детали (рис. 1) в процессе автоматизированного проектирования, представляющего множество вариантов реализации детали со своими фиксированными наборами параметров, вводится определение *состояния системы S*. Применение его для развития теоретической базы автоматизированного проектирования требует корректного математического определения, обеспечивающего достоверность и обоснованность используемой при этом математической модели.

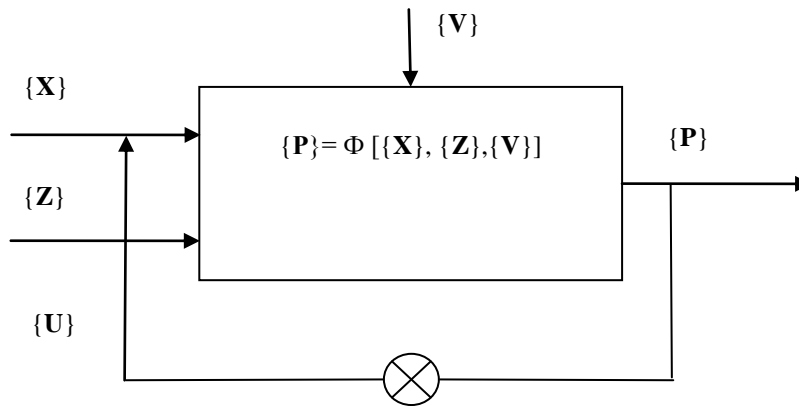


Рис. 1. Система управления процессом формирования массива конструктивно-технологических параметров детали P_p

Утверждение 2.1. Теоретико-множественная модель $\{P\} = \Phi[\{X\}, \{Z\}, \{V\}]$, определяющая связь между выходными параметрами $\{P\}$ детали, состояниями системы S , параметрами элементов $\{X\}, \{Z\}$, при воздействии внешних факторов $\{V\}$ описывает поведение динамической системы $\Sigma = [T, \{S\}, \{X\}, \{Z\}, \{\Omega\}, \{P\}, \{\Gamma\}, \{V\}, N, \Phi]$.

Доказательство

Определим свойства системы, описываемой моделью (3), рис. 1.

1. Заданы следующие множества: множество моментов времени T ; множество состояний S ; множества значений, определяемых входным управлением системы $\{X\}, \{Z\}, \{\Omega\}, \{V\}$; множества выходных значений $\{P\}, \{\Gamma\}$; способ преобразования $\Phi = \{f: T \rightarrow \{P\}\}$; способ преобразования $F = \{\varphi: T \rightarrow U\}$.

2. *Направление времени.* Множество T – упорядоченное подмножество множества действительных чисел – дискретных отсчетов времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$.

3. Пространство допустимых входных функций F удовлетворяет следующим условиям:

а) *нетривиальность.* Множество $\{\Omega\}$ непусто. Система (рис. 5) замкнута. Основная функция автоматизированной системы – изменение $\{X\}$ с целью поиска оптимального значения $\{P\}$ при соблюдении ограничений $\{X\} \in \Omega, \{Z\} \in \Omega, \{V\} \in \Omega$;

б) *сочленение входных воздействий.* Входной «отрезок» $\varphi(t_1, t_2]$ – функция $\varphi \in F$, заданная на временном интервале $(t_1, t_2] \cap T$. Если $\varphi, \varphi' \in F$ и $t_1 < t_2 < t_3$, то найдется функция $\varphi'' \in F$, для которой $\varphi''(t_1, t_2] = \varphi(t_1, t_2]$ и $\varphi''(t_2, t_3] = \varphi'(t_2, t_3]$. Входной «отрезок» $f(t_1, t_2]$ – функция $f \in \Phi$, заданная на временном интервале $(t_1, t_2] \cap T$. Если $f, f' \in \Phi$ и $t_1 < t_2 < t_3$, то найдется функция $f'' \in \Phi$, для которой $f''(t_1, t_2] = f(t_1, t_2]$ и $f''(t_2, t_3] = f'(t_2, t_3]$.

4. Задана переходная функция состояния f , которая определяет состояние $s(t) = f(t; \tau, s, \varphi) \in S$, достигнутое в момент времени $t \in T$ при управляющем воздействии $\varphi \in F$, если в начальный момент времени $\tau \in T$ начальное состояние $s = s(\tau) \in S$. Функция f обладает следующими свойствами:

а) *направление времени.* Функция f определена для всех значений $t \geq \tau$ и необязательно определена для всех значений $t < \tau$;

б) *согласованность.* Равенство $f(t; t, s, \Omega) = s$ выполняется при всех $t \in T, s \in S, \varphi \in F$;

в) *композиционное свойство.* Для любых значений $t_1 < t_2 < t_3$ и любых состояний $s \in S$ и всех входов $\varphi \in F$ имеет место $f(t_3; t_1, s, \varphi) = f(t_3; t_2, f(t_2; t_1, s, \varphi), \varphi)$;

г) *причинность.* Если $\varphi, \varphi' \in F$ и $\varphi(t; \tau) = \varphi'(t; \tau)$, то $f(t; \tau, s, \varphi) = f(t; \tau, s, \varphi')$.

5. Существует соответствие выхода $q: T \times S \rightarrow \{P\}$, определяющее выходную величину $p(t) = q(t, s(t))$. Соответствие $q(\sigma, f(\sigma; \tau, s, \varphi))$ при $\sigma \in (\tau, t]$ является выходным отрезком $f(t; \tau]$ некоторой выходной функции Φ , которая задана на интервале $(t; \tau]$. Пара $(\tau, s]$, где $\tau \in T$ и $s \in S$, представляет событие в динамической системе Σ . Множество $T \times S$ определяет пространство событий в этой системе.

Система является физически реализуемой, если ее выход и состояние в произвольный момент времени t_0 является функцией только от тех входов, которые воздействуют на систему до момента времени t_0 .

Система детерминирована, так как ее выход и состояние в любой момент времени t можно достоверно определить по ее состоянию в некоторый момент времени $t_0 < t$ и по известному входу из полузамкнутого интервала $[t_0, t)$. Полученные свойства 1- 5, 3а, 3б, 4а– 4г строго соответствуют аксиомам динамической системы Р. Калмана [5], что позволяет определить предложенную систему Σ (3) как динамическую, а ее модель (1) отнести к разновидности динамических моделей.

Что и требовалось доказать.

Утверждение 2.2. Множество \mathbf{S} описывает состояние динамической системы Σ в момент времени t , если оно удовлетворяет условиям согласованности [6].

Доказательство

Векторы $s(t_0)$, $u(t_0, t]$, где $u(t_0, t]$ обозначает входной отрезок на полузамкнутом интервале $(t_0, t]$, однозначно определяют выходной отрезок $p[t_0, t)$ для всех начальных состояний $s(t_0) \in \mathbf{S}$ при всех значениях $t \geq t_0$ и для всех входных функций $u \in \Omega$. В результате имеем

$$p(t_0, t) = f[s(t_0); u(t_0, t)], \text{ или } y(t) = f[s(t_0); u(t_0, t)]. \quad (5)$$

Следствие 2.1. Из (5) следует, что Σ является детерминированной системой, не имеющей случайных элементов, и не является упреждающей, так как настоящее значение выхода не зависит от будущих значений входа.

Пусть t_1 – некоторый момент времени между t_0 и t . Тогда для каждого входного вектора $u(t_0, t]$ и наблюдаемого выходного вектора $p(t_0, t]$, которые рассматриваются с момента времени t_1 , так что они дают отрезки $u(t_1, t]$ и $p(t_1, t]$, существует непустое подмножество элементов из пространства \mathbf{S} , обозначаемое через $\mathbf{S}[s(t_0); u(t_0, t)]$, каждый элемент α которого удовлетворяет соотношению

$$p(t_1, t) = f[\alpha; u(t_0, t)]. \quad (6)$$

Следствие 2.2. Условие (6) гарантирует, что каждой паре $u(t_0, t]$ и $p(t_1, t]$ соответствует начальное состояние $s(t_1)$ из \mathbf{S} .

Если $u(t_0, t]$ неизменно, а $u(t_1, t]$ изменяется на всех входах пространства входов системы Σ , то пересечение множеств $\mathbf{S}[s(t_0); u(t_0, t)]$, рассматриваемых на всех значениях $u(t_1, t]$, не является пустым множеством. Полученное условие и соотношение (6) определяют состояние системы Σ в момент времени t , заданное начальным состоянием $s(t_0)$ и входной вектор-функцией $u(t_0, t]$:

$$s(t) = G[s(t_0); u(t_0, t)], \quad (7)$$

где G – однозначная функция своих аргументов. При этом любые два состояния α^1 и α^2 эквивалентны, если для всех значений u из пространства входов системы Σ реакция системы, соответствующая начальному состоянию α^1 , совпадает с реакцией, соответствующей начальному состоянию α^2 .

Следствие 2.3. Условие (7) гарантирует существование, по крайней мере, одного состояния в пространстве \mathbf{S} , которое относится ко всем возможным парам входов и выходов $u(t_1, t]$ и $p(t_1, t]$ соответственно.

Следствие 2.4. Полученные условия (5)–(7) и следствия 2.1 – 2.3 индифферентны к непрерывному или дискретному характеру независимых переменных времени t [6], что позволяет обобщать подходы и методы исследования динамических систем, традиционно применяемые для непрерывных систем преобразования и обработки информации [7], описываемых дифференциальными уравнениями и в обязательном порядке имеющих пространства входных воздействий.

Полученные соотношения (5)–(7) выражают и полностью соответствуют условиям согласованности динамической системы, введенным Л. Заде при определении понятий состояния системы и переменных состояния [5, 6].

Что и требовалось доказать.

Замечание 2.1. Под управляющим воздействием U со стороны ЛПП в данном случае в процессе проектирования детали рассматриваются любые алгоритмы формирования наборов массивов параметров и изменения их значений, реализуемые САПР, или прямые воздействия проектировщика на параметры проектируемой детали. Определение информационной модели формирования массива конструктивно-технологических параметров детали как динамической системы, представляющей по своей математической сути три основных множества $\{X\}$, $\{Z\}$ – входных переменных и $\{P\}$ – интегральных выходных характеристик (при условии их корректного описания) с определенным отношением между их элементами Φ , заданным соответствием $\{q\}=\{X, Z, V, P, \Phi\}$ в виде отображения множеств $\{X\}, \{Z\}$ (как аналогов входных воздействий) в множество $\{P\}$ (как аналог реакций системы), требует обязательного назначения для каждого варианта реализации системы, наряду с множеством входных воздействий, еще и множества состояний динамической системы. Введенное множество S определяет необходимую совокупность признаков, характеризующих объект, и позволяет идентифицировать его в данный момент времени, а также прогнозировать его дальнейшее поведение.

Анализ особенностей применения предложенной выше модели, проведенный на основе признаков, сформулированных в [7], позволил определить ее характерные свойства:

- *динамичность.* Обусловлена наличием зависимости выходных параметров модели не только от входных воздействий в текущий момент времени t_i , определяемых параметрами элементов, но и от их предыдущих значений в моменты $t_i - \tau$;
- *нелинейность.* Определяется тем, что реакция модели на изменения двух и более входных воздействий не эквивалентна сумме реакций на каждое из этих возмущений в отдельности;
- *детерминированность.* Определена отсутствием внутри модели элементов с неконтролируемым или стохастическим изменением их параметров и соответствующими зависимостями от них выходных параметров модели;
- *дискретность.* Задается характером изменения параметров элементов, принимающих значения из конечного множества величин и изменяемых в дискретно определенные моменты времени.
- *стационарность.* Определяется независимостью реакции системы от промежутка времени, на который эта реакция определена, при условии, что система находилась в заданном состоянии, определяемом зафиксированным конечным множеством элементов и их параметров. То есть основные соотношения (функционал Φ) и структура модели не меняются во времени.

Перечисленные свойства позволяют применить для ее описания математическое определение *динамической модели* [3, 5].

Такое определение позволяет выработать общую терминологию, единый универсальный математический аппарат и выявить общие закономерности и единство в разнообразных приложениях модели. В каждом конкретном применении путем введения условий, ограничений и упрощений становится возможным получение полезных результатов, адекватных практической реализации моделируемых систем.

Анализ предлагаемой динамической информационной модели формирования массива конструктивно-технологических параметров детали позволяет выявить ее непосредственную связь с моделями функционирования динамических систем автоматического управления, применяемыми в соответствующих САПР и построенными в соответствии с классическим определением динамической системы [5]. Действительно, в отличие от развиваемых в работах [8] моделей различных систем автоматического управления, где оператор G , устанавливающий связь между состоянием системы и ее выходной величиной, описывается в виде дифференциальных уравнений, в нашем случае G определяется функционалом Φ , выражающим теоретико-множественное соответствие $\{q\}=\{X, Z, V, P, \Phi\}$ с учетом воздействия внешних факторов $\{V\}$.

Таким образом, проведенный анализ динамической модели при проектировании дает

возможность определить предлагаемую математическую модель (3) как структурно-параметрическую модель в пространстве состояний [5, 6]. Модель позволяет описывать функционирование САПР в процессе формирования конструктивно-технологических параметров при проектировании детали [9, 10].

Библиографический список

1. **Бурков, В.Н.** Основы математической теории активных систем / В.Н. Бурков. – М.: Наука, 1977. – 255 с.
2. **Хранилов, В.П.** Нечеткая динамическая модель интерактивного распределения вычислительных ресурсов / В.П. Хранилов, Д.В. Прохоров // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 4.1(26). С. 189–193.
3. **Тесленко, Е.В.** Динамическая модель управления конструкторско-технологическим взаимодействием в САПР / В.В. Андреев, В.П. Хранилов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. №3. С. 64–67.
4. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем/ Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
5. **Калман, Р.** Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арbib; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Мир, 1971. – 400 с.
6. **Стрейц, В.** Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления: [пер. с англ.] / В. Стрейц; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1985. – 296 с.
7. **Растрингин, Л.А.** Современные принципы управления сложными объектами / Л.А. Растрингин. – М.: Сов. Радио, 1980. – 232 с.
8. **Пупков, К.А.** Методы классической и современной теории автоматического управления: В 3 т. Методы современной теории автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. А.И. Баркин; под ред. Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. Т. 3. – 748 с.
9. **Андреев, В.В.** Интеллектуальная информационная система технологического проектирования в САД-системах / В.В. Андреев, Е.В. Тесленко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. №6. С. 90–92.
10. **Тесленко, Е.В.** Информационная модель массива параметров деталей машиностроения для системы технологического и метрологического сопровождения процесса проектирования/ Е.В. Тесленко, В.В. Андреев // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 3. С. 40–44.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

V.P. Hranilov, E.V. Teslenko, V.V. Andreev

THE ANALYSYS OF THE DYNAMIC DESIGN-ENGINEERING INTERACTION MANAGEMENT MODEL IN CAD

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Identification of the relationship between the proposed information model of the array design and technological parameters formation and the models of the automatic control dynamic systems.

Design/methodology/approach: The systematic analysis of the proposed model features based on the character of dynamical systems.

Findings: the analysis of dynamic model of the design makes it possible to define a mathematical model of how structural parametric model in the state space.

Research limitations/implications: Developed a dynamic model allows us to describe the formation of structural and technological parameters of the design details.

Originality/value: The model, which is developed as a structural-parametric model in the state space, allows to develop common terminology, a single universal mathematical formalism and to identify common patterns and unity in a variety of applications.

Key words: computer-aided design, mathematical model, assembly, constructive and technological parameters of detail.

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин¹, И.Л. Лаптев¹, Д.А. Шатагин¹, В.О. Зотов¹, С.В. Серый²**ДИАГНОСТИКА ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева¹,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет²

Изложена методология диагностики технологического оборудования на основе фрактального и вейвлет-анализа виброакустического сигнала с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени. Показана возможность управления динамическими технологическими системами и износом инструмента при удаленном доступе.

Ключевые слова: износ инструмента, фрактальный и вейвлет-анализы, искусственный интеллект, удаленный доступ.

Надежность, производительность и степень автоматизации современного промышленного оборудования в значительной мере определяют экономический эффект в машиностроительном производстве. Систематические и случайные сбои в работе технологических систем приводят к длительным и нежелательным простоям, а также высокому проценту брака изготавливаемых деталей. Для решения подобных проблем необходимо использование передовых систем диагностики состояния технологических систем, учитывающих инновационные разработки не только в технологической и конструкторской сфере, но и в области информационных технологий, так как современное производство глубоко автоматизировано.

Одним из важнейших результатов современного развития науки и техники является конвергенция промышленных технологий с разработками в сфере информационных технологий. Высокие достижения в области обмена информацией и вычислений позволяют реализовывать передовые системы диагностики и управления технологическими системами с удаленным доступом. Работая в режиме реального времени, такие системы позволяют отслеживать, контролировать и управлять параметрами ТС на значительном расстоянии.

Анализ существующих систем диагностики состояния ТС

Принцип действия большинства систем диагностики основан на синтезе и анализе данных ответственных узлов машин с последующим принятием соответствующего решения. Синтез данных осуществляется при помощи контрольно-измерительных устройств, таких как датчики сил и крутящего момента, датчики мощности, вибродатчики и т.д. Полученная информация обрабатывается и анализируется с помощью либо встроенной, либо автономной вычислительной системы. Как правило, на этом этапе полученные характеристики сравниваются с допустимыми значениями записанными в базе данных, где принимается решение о генерации управляющего воздействия.

Большинство систем диагностики основываются на сравнении полученного сигнала с допустимыми значениями, заложенными в базе данных, поэтому появляется трудность в определении допустимых значений контролируемых параметров при разных условиях работы. Например, при смене геометрии инструмента необходимо заново рассчитать допустимые значения параметров сил, мощности и вибрации для конкретной технологической наладки. Как правило, такие значения получают опытным путем или по неточным линейным мате-

матическим моделям, описывающим поведение системы. Отсутствие самообучения негативно сказывается на возможности идентификации неисправностей. Каждый новый экстренный случай, сбой или поломка приведет к потере устойчивости системы и ее остановки. Существующие системы диагностики отличаются низкими адаптивными способностями. Изменение контролируемых параметров, как правило, приводит к остановке системы в целом, а не её подстройки под новые технологические условия.

Принимая во внимание недостатки существующих систем диагностики, предлагается использовать системы на основе искусственного интеллекта, с возможностью самообучения и удаленного контроля и управления.

Особенности интеллектуальных систем с возможностью удаленного доступа

Искусственный интеллект реализует постоянное самообучение системы. Система постоянно анализирует свое поведение, тем самым расширяет свои возможности и повышает надежность машины в целом. Изменение условий работы не приводит к остановке. Система, основываясь на собственном опыте, определяет критические значения параметров. Любые изменения и ответная реакция системы постоянно записываются в соответствующую базу данных, тем самым позволяя системе производить анализ данных и расширять свои возможности в диагностике. Наличие высоких интеллектуальных возможностей позволяет производить гибкую подстройку параметров системы для работы в оптимальных условиях без остановки. Постоянный анализ своей работы в определенных условиях дает возможность прогноза сбоев в работе и генерации управляющих воздействий на опережение. Удаленный доступ позволяет вести централизованный контроль за работой множества единиц оборудования и принимать своевременные решения по управлению в соответствии с правами доступа.

Для достижения поставленных целей была создана интеллектуальная система диагностики, включающая в себя модуль сбора и отправки данных (вибродатчики, усилители-преобразователи, платы сбора и отправки данных), модуль обработки данных и принятия решений (ПК с разработанным программным обеспечением реализующим вейвлет и фрактальный анализ с использованием нейронных сетей для генерации соответствующего управляющего воздействия), модуль удаленного доступа (беспроводные защищенный сети и устройства ввода и вывода информации).

Вейвлет-анализ при диагностики виброакустического сигнала

Для получения частотных характеристик динамических систем широко используют спектральный анализ виброакустического сигнала. Наибольшее распространение в качестве методов спектрального анализа получили «Быстрое преобразование Фурье» и «Оконное преобразование Фурье». Однако данные методы не позволяют точно локализовать частотные характеристики системы во времени, и возникают трудности в идентификации колебаний, далеких по форме от косинуса и синуса, и определение случайных всплесков характерных для механической обработки. Для решения этой проблемы предлагается использовать вейвлет-анализ виброакустического сигнала, как из зоны резания, так и из ответственных узлов и агрегатов машины. Вейвлет-функция позволяет точно определить частотные характеристики во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе.

Как показали исследования [1], при незначительном износе режущего инструмента ($h_z=0.15$), путем применения вэйвлет-анализа, на скалограмме компоненты на всем спектре частот ярко выделены, хорошо прослеживается периодичность сигнала, что соответствует визуальной картине колебаний на осциллограмме. Мощность сигнала распределена по средней части спектра частот.

С увеличением износа инструмента меняется энергетика сигнала – при параметрах износа, близких к катастрофическому, основная мощность сигнала приходится на высокочастотные шумовые компоненты, что свидетельствует об отсутствии процесса резания как та-

кового, а поступающая от резца энергия затрачивается на поверхностное упрочнение заготовки и нагрев.

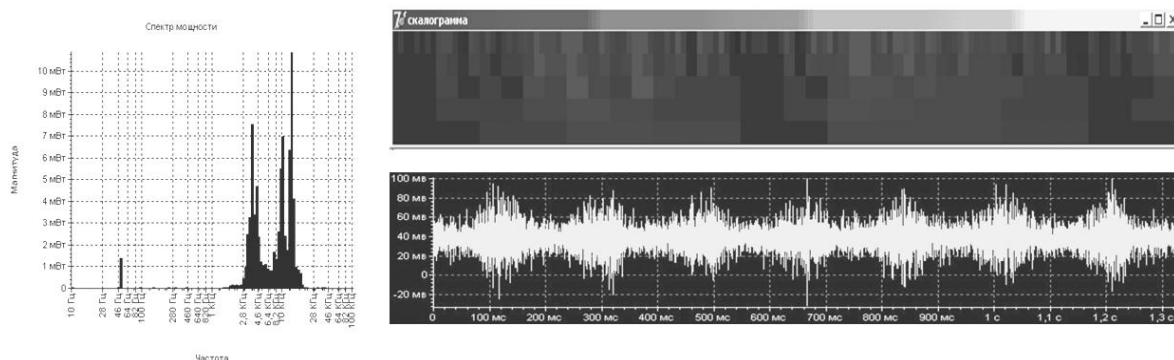


Рис. 1. Спектрограмма и скалограмма при незначительном износе режущего инструмента ($h_z=0,15$ мм)

Исследования показывают, что при увеличении износа инструмента компоненты сигнала (2,5-3,5 кГц), характеризующие процесс резания, принимают более сглаженный характер, но при этом появляются высокочастотные всплески, что свидетельствует о повышении уровня зашумленности. В тоже время на вейвлет-скалограмме видно, что при увеличении износа инструмента спектр частот, характеризующих резание, расширяется, мощность его увеличивается. Расширение спектра свидетельствует о повышении энергии виброакустического сигнала и увеличении энергии разрушения и дальнейшем увеличении степени износа.

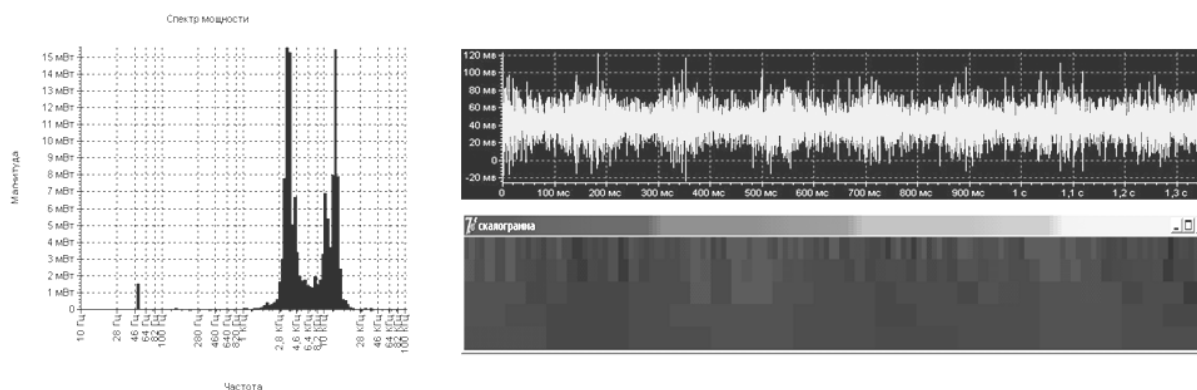


Рис. 2. Спектрограмма и скалограмма при катастрофическом износе режущего инструмента ($h_z=1,1$ мм)

Фрактальный анализ фазового портрета системы

Для анализа поведения системы предлагается использовать понятие фазового пространства системы, аттрактор системы и его фрактальная размерность. В идеальных условиях при отсутствии упругих и диссипативных связей в системе производящая поверхность инструмента должна перемещаться только вдоль образующей и направляющей, определяя параметры номинальной поверхности. При таких условиях аттрактором системы в фазовом пространстве будет «точка». Это означает, что вся энергия системы расходуется только на получения номинальной поверхности, образования стружки и деление припуска на части.

По исходным технологическим данным был проведен эксперимент. В качестве изменяемого и контролируемого параметра был параметр износа инструмента h_z – фаска износа по задней поверхности. При минимальном значении параметра износа аттрактор системы представлял собой эллипс с фрактальной размерностью $D_f=1.165$. При увеличении значения

параметра износа вид и фрактальная размерность систем изменяются. Рассеивание энергии в системе увеличилось. При $h_z = 1.1$ мм, $Df = 1.18$. По полученным данным можно судить о возможной потере устойчивости.

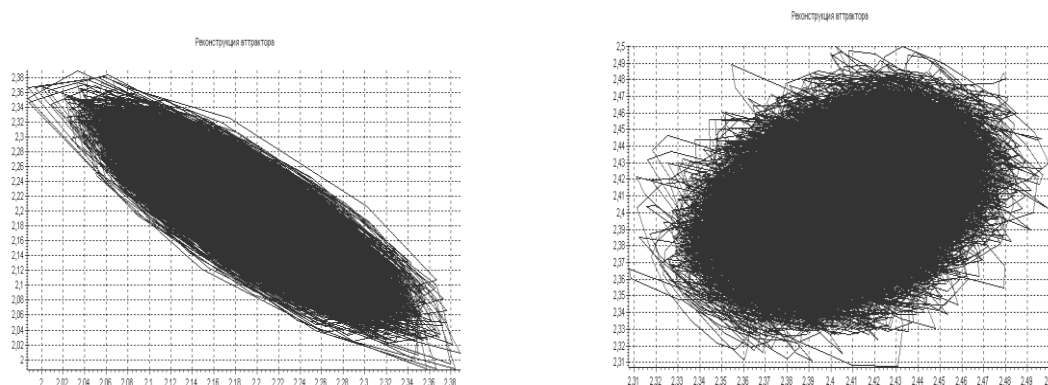


Рис. 3. Аттрактор системы:

а - при незначительном износе режущего инструмента ($h_z = 1.1$ мм), $Df = 1.165$;
б - катастрофическом износе режущего инструмента ($h_z = 1.1$ мм), $Df = 1.18$

Искусственный интеллект в диагностики и управлении

Для прогнозирования поведения системы по типу аттрактора и его фрактальной размерности применяются нейронные сети. Это позволяет осуществлять прогноз сбоев, неполадок и эволюции системы во времени. Также это даёт возможность определения параметров порядка в системе, отвечающих за устойчивость системы в целом.

Принципиальная схема системы диагностики на основе ИИ в канале обратной связи содержит нейросетевой модуль генерирующий управляющее воздействие. Наличие базы знаний и постоянный учет параметров позволяют накапливать станку опыт и постоянно самообучаться. Это означает, что чем больше станок работает, тем шире его возможности и выше надежность. Во время работы станок контролирует определенные параметры, что позволяет проследить, какой фактор или параметр привел к сбою. Объединение станков с помощью сети Интернет позволит осуществлять обмен между базами знаний конкретных станков. Происходит обучение между станками.

Для решения поставленных задач использовалась ранее разработанная нейросетевая модель [2], позволяющая генерировать временные ряды, характеризующие динамику упругой системы станка (УСС) на заданных режимах резания. Небольшая модификация модели позволит выявить, в какой степени каждый управляющий параметр (скорость, глубина резания, материал и т.д.) оказывает влияние на генерируемый сигнал.

Таким образом, путем анализа выходного сигнала модели была последовательно проведена оценка каждого из управляющих параметров:

- скорости v резания;
- глубины t резания;
- подачи s ;
- предела прочности σ_b обрабатываемого материала;
- параметра r фазового сдвига силы резания [3].

Предлагаемая методика использования нейросетей для оценки степени влияния и сравнительного анализа значимости факторов (управляющих параметров) механообработки была опробована на следующей модели [2], изображенной на рис. 4.

Данная методика базируется на нейронной сети (многослойном перцептроне), на вход которой подаются вектор оцениваемых управляющих параметров \vec{F} и вектор \vec{T} , содержа-

ший заданное число отсчетов временного ряда, которые характеризуют динамику станка при заданных управляющих параметрах в текущий момент времени.

Число выходов нейросети совпадает с размерностью вектора \vec{T} , содержащего отсчеты временного ряда, поданные на вход, плюс значение ряда в следующий момент времени (прогноз). При этом в процессе обучения ставилась задача – достигнуть минимальной невязки между значениями временного ряда, подаваемыми на вход (вектор \vec{T}) со значениями ряда на выходе плюс верное значение прогнозируемого отчета, т.е. нейросеть была обучена последовательно моделировать весь временной ряд при заданном векторе управляющих параметров, который в процессе обучения не менялся.

В результате обучения нейросеть представляет собой модель динамической системы станка в процессе резания, так как способна выдавать временной ряд, аналогичный сигналам акустической эмиссии, характеризующих динамику станка при заданным управляющих параметрах обработки [2].

Далее достигается следующая задача – оценка степени влияния каждого из параметров на корректность моделируемой динамики. Оценка производится по следующему алгоритму:

- из нейромодели исключается вход, на который подавался оцениваемый фактор;
- производится обучение нейросети при отсутствии заданного управляющего параметра;
- в процессе обучения циклически подсчитывается невязка между входным вектором, содержащим значения временного ряда, и выходным, тем самым, по величине невязки производится оценка того, как нейронная сеть реагирует на отсутствие одного из управляющих входов;
- разница между невязками исходной модели и ее же, но без одного из управляющих факторов, является количественной характеристикой степени влияния данного фактора на динамику модели, а значит, и самого станка.

Практическая реализация обоих подходов показала принципиально схожие результаты, но следует отметить, что процесс обучения нейронной сети при подаче на один из ее входов шумовой составляющей приблизительно на порядок продолжительнее, чем при методике исключения оцениваемого фактора из вектора \vec{F} .

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее значимым параметром является скорость резания. Значимость этого фактора оценивается 34% (от совокупной значимости вектора \vec{F} – 100%).

Можно предложить дальнейшее развитие данной методики оценки весов управляющих параметров нейромодели: по какому-либо критерию, единому для заданного временного ряда, например на основе фрактальной размерности D_0 , рассчитанной для ряда. В таком случае следует предварительно обучить нейросеть генерировать значение фрактальной размерности для заданного временного ряда при известных управляющих параметрах. Затем менять эти параметры по описанному алгоритму и оценивать в данном случае степень изменения значений фрактальной погрешности на выходе нейросети. Тем самым будут найдены весовые коэффициенты для каждого из изменяемых параметров.

Предложенный способ более прост в практической реализации, так как имеется уже разработанное программное обеспечение, подсчитывающее фрактальную размерность [3], поэтому остается только обучить нейросеть на известных значениях размерности и, варьируя входные управляющие параметры, подсчитать веса для каждого из них.

Таким образом, можно произвести оценку каждого из управляющих параметров. Благодаря такой оценке появляется возможность расставить управляющие параметры по приоритету, а самые малозначимые – удалить из модели, так как они ни оказывают существенного влияния на результат моделирования, но загромождают модель. Также дальнейшим развитием приведенной методики может стать возможность оценки взаимосвязи управляющих параметров между собой, степени их взаимного влияния, характера такого взаимодействия.

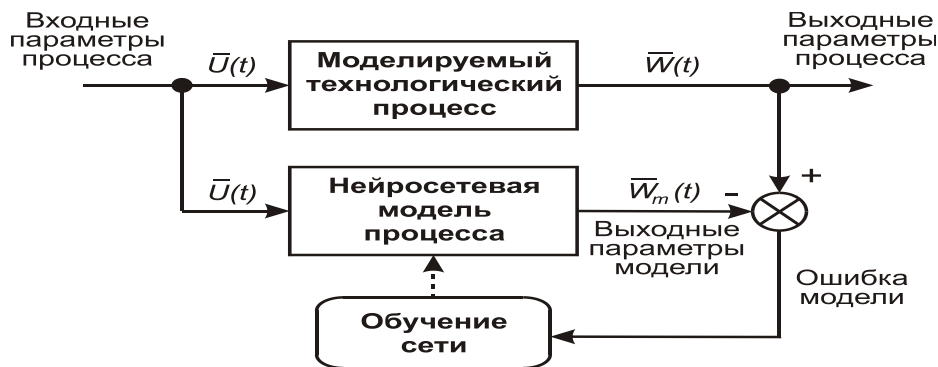


Рис. 4. Схема обучения нейронной сети при механической обработке

Использование технологии nVidia CUDA в системах диагностики

Системы диагностики должны отличаться высокой производительностью для обеспечения быстрого реагирования на изменения параметров. Любая технологическая система обработки резанием содержит огромное количество контролируемых параметров, стохастических внешних и внутренних возмущений. Высокие скорости резания и подачи накладывают дополнительные требования к производительности современных систем диагностики.

Современная тенденция в высокопроизводительных системах – использование параллельных вычислений. Это подразумевает использование для сложных математических расчетов процессора графических карт вкупе с центральным процессором. Наличие большого количества ядер графического процессора (3000 и более) позволяет использовать параллельные вычисления и добиться прироста в производительности до 1000 раз. На современном рынке компьютерных технологий имеется довольно широкий выбор современных графических карт с технологией nVidia CUDA. Данная технология находит все большее распространение среди ученых разных отраслей, инженеров и программистов.

Используя технологии nVidia CUDA, появилась возможность создавать мощные вычислительные станции, производительностью свыше 1 терафлопс, с небольшими габаритами и приемлемой для большинства фирм, использующих станочный парк, стоимостью. Подобная вычислительная станция или сервер, в зависимости от мощности, может осуществлять контроль и управление одновременно целым парком станков, оснащенных интеллектуальной системой диагностики. Данный подход позволяет реализовывать единую схему управлением и контроля, что, в свою очередь, избавляет от необходимости оборудовать каждый станок собственным вычислительным комплексом.

Удаленный доступ в диагностике и управлении

Для интеграции оборудования и рабочего персонала в рамках единой интеллектуальной системы диагностики состояния технологических систем необходимо использование современных достижений в области передачи информации. Современные возможности позволяют полностью удовлетворить потребности в использовании проводных и беспроводных каналов передачи данных.

Разработанное программное обеспечение интеллектуальной диагностики, установленное на вычислительной станции, реализует удаленное управление и контроль над оборудованием посредством сетей Wi-Fi, планшетных ПК и пакета программного обеспечения TeamViewer или Putty. Доступ к управлению осуществляется в соответствии с правами, определенными производственной системой предприятия.

Внедрение подобных систем в реальное производство позволит в значительной степени повысить качество и производительность технологических систем, за счет постоянного мониторинга процесса резания, снизить человеческий фактор в силу интеллектуальности, а возможность самообучения и современные методы связи позволят создавать промышленные

сети обмена данными для последующего накопления базы знаний и быстрого реагирования на изменения в технологическом процессе.

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю.Г.** Управление динамическим качеством металлорежущих систем на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2004. – 240 с.
2. **Кабалдин, Ю.Г.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В.Серый. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. – 201 с.
3. **Кабалдин, Ю. Г.** Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика, управление / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 296 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

Yu.G. Kabaldin¹, I.L. Laptev¹, D.A. Shatagin¹, V.O. Zotov¹, S.V.Sery²

DIAGNOSIS TOOL WEAR BASED ON THE FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN REAL TIME WITH REMOTE ACCESS CAPABILITIES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Komsomolsk-on-Amur state technical university²

Purpose: The development of an intelligent system diagnostics tool wear based on nonlinear dynamics approaches in real-time with remote access and management.

Methodology: Wavelet analysis of vibro-acoustic signal from the cutting zone. Determination of the fractal dimension of the attractor of the system and its simulation using a neural network.

Findings: The methodology of diagnosis process equipment based on fractal and wavelet analysis of vibro-acoustic signal using implanting artificial intelligence in real-time. The possibility of controlling the dynamic technological systems and tool wear during remote access.

Key words: tool wear, fractal and wavelet analysis, Artificial Intelligence, and remote access.

УДК 621.9

С.В. Серый

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР
С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Изложены основные положения моделирования наноструктур из тугоплавких соединений, использующихся в качестве износостойких покрытий для режущего инструмента. Предложена пространственная атомная структура наночастиц размером от пяти до пятнадцати нанометров. Определены их упругие и прочностные свойства, а также распределение электронной плотности на уровне Ферми и энергии межатомной связи.

Ключевые слова: наночастицы, функциональные свойства, износостойкость.

Сборка наноструктур – это технология осуществления манипулирования атомами. При разработке наноструктур (наносистем) с заданными функциональными свойствами необходимо использовать подходы квантовой механики и её основные принципы [1].

При разработке наноструктур с заданными функциональными свойствами путём атомной сборки важно учитывать положение (координаты) каждого атома. Эта задача успешно решается пока только математическим моделированием.

Если в традиционных металлических материалах положение атомов в узлах кристаллической решётки определено, т.е. существует обычная повторяемость или простая трансляция элементарной ячейки, то в сложной наноструктуре организацию атомов необходимо задавать. Поэтому возникает естественный вопрос: каковы принципы организации последовательности расположения атомов в наноструктуре и её форма для обеспечения заданных функциональных свойств?

Существует ряд методов расчёта энергии межатомных связей в структуре, самый достоверный из которых *abinitio*-метод функционала электронной плотности. Однако в силу указанных требований, т.е. необходимость точного определения координат каждого атома, существующие программные продукты (GAMESS, Abinit, FHI и др.) оказываются достаточно эффективными при математической моделировании сборки наноструктур небольшого порядка (10^2 - 10^3 атомов). Кроме того, не ясно, можно ли на основе расчёта полной энергии или энергии связи атомов прогнозировать функциональные свойства наноструктур, так как они зачастую определяются её формой? В этой связи необходимы новые подходы к прогнозированию функциональных свойств наноструктур.

Разработан метод моделирования на основе теории функционала плотности (ТФП, англ. -DFT). Согласно ТФП, все электронные свойства системы, включая энергию, могут быть получены из электронной плотности (без знания волновых функций). Применяют два типа ТФП: приближение локальной плотности, где предполагается, что локально электронная плотность систем может быть описана как электронная плотность однородного электронного газа, и приближение локальной спиновой плотности, где электронная плотность разделяется на плотность электронов со спинами α и β . Электронная плотность – мера «плотности» электронного облака в данном месте, плотность вероятности присутствия электронов.

Функция определена во всем пространстве. Интеграл от электронной плотности по всему пространству дает полное число электронов. Кинетическая энергия электронов описывается явно в приближении независимых частиц, классическая часть потенциальной энергии описывается по закону Кулона.

Самая важная характеристика электронного основного состояния – его энергия $E(3)$. С

помощью методов волновых функций E можно найти или непосредственно путем приближенного решения уравнения Шрёдингера, или из принципа Рэлея-Ритца:

$$E = \min_{\tilde{\Psi}} (\tilde{\Psi} H \tilde{\Psi}), \quad (1)$$

где $\tilde{\Psi}$ – пробная волновая функция основного состояния. Этот принцип можно сформулировать на языке электронной плотности $\tilde{n} = \tilde{\Psi} \cdot \tilde{\Psi}$. При фиксированной плотности можно определить условный минимум энергии таким образом:

$$E_v[\tilde{n}(r)] \equiv \min_{\alpha} (\tilde{\Psi}_{\tilde{n}}^{\alpha} H \tilde{\Psi}_{\tilde{n}}^{\alpha}) = \int v(r) \tilde{n}(r) dr + F[\tilde{n}(r)], \quad (2)$$

где T и U – кинетическая и потенциальная энергия соответственно,

$$F[\tilde{n}(r)] \equiv \min_{\alpha} (\tilde{\Psi}_{\tilde{n}(r)}^{\alpha}, (T + U) \tilde{\Psi}_{\tilde{n}(r)}^{\alpha}), \quad (3)$$

Этот функционал F не требует точного знания потенциала $v(r)$. Далее можно минимизировать энергию

$$E = \min_{\tilde{n}(r)} E_v[\tilde{n}(r)] = \min_{\tilde{n}(r)} \left\{ \int v(r) \tilde{n}(r) dr + F[\tilde{n}(r)] \right\}, \quad (4)$$

В случае невырожденного основного состояния минимум достигается тогда, когда $n(r)$ есть плотность основного состояния, а для вырожденного основного состояния – когда $n(r)$ есть одна из плотностей основного состояния (любая). Итак, труднопреодолимая проблема поиска минимума [1] по $3N$ -мерным пробным функциям $\tilde{\Psi}$ (N – число частиц в системе) преобразована в кажущуюся тривиальной по своему виду задачу нахождения минимума $E_v[\tilde{n}]$ по 3-мерным пробным функциям $\tilde{n}(r)$. В действительности определение (3) для $F[\tilde{n}]$ приводит нас обратно – к минимизации по $3N$ -мерным пробным волновым функциям.

Дальнейшее развитие этого формализма в духе приближения Хартри приводит к согласованным уравнениям, которые и называются уравнениями Кона–Шэма:

$$\left(-\frac{1}{2} \nabla^2 + v_{eff}(r) - \varepsilon_j \right) \varphi_j(r) = 0$$

$$v_{eff}(r) = v(r) + \int \frac{n(r')}{|r-r'|} dr' + v_{xc}(r), \quad (5)$$

где $v_{xc}(r)$ – так называемый обменно-корреляционный потенциал, ε_j и φ_j – одночастичная энергия и одночастичная волновая функция (для j -й частицы), а плотность $n(r)$ определяется следующим образом:

$$n(r) = \sum_{j=1}^N |\varphi_j(r)|^2, \quad (6)$$

Полная энергия основного состояния определяется так:

$$E = \sum_j \varepsilon_j + E_{xc}[n(r)] - \int v_{xc}(r) n(r) dv - \frac{1}{2} \int \frac{n(r)n(r')}{|r-r'|} dr', \quad (7)$$

Нужно, однако, отметить, что до сих пор существует проблемы выбора обменно-корреляционного потенциала и выбора базисных волновых функций.

Никаких особых ограничений на форму $v_{xc}(r)$ уравнения (5) не предполагают, поэтому широкое распространение получил способ выбора этого локального потенциала в виде потенциала для однородного электронного газа – так называемое приближение локальной плотности (local density approximation, LDA):

$$E_{xc}^{LDA} = \int e_{xc}[n(r)] n(r) dr,$$

где $e_x(n) = \frac{0,458}{r_s}$ – обменно-корреляционная энергия однородного электронного газа, а r_s –

радиус сферы, приходящейся на один электрон, определяется как $\frac{4\pi}{3} r_s^3 = \frac{1}{n}$.

Это приближение, широко распространённое при исследовании различных объектов, тем не менее, плохо работает для изоляторов и некоторых других систем и в настоящее время используется в основном как начальное приближение.

Проблема выбора базисных функций, которые используются при решении уравнений Кона–Шэма, заключается в том, что их число должно быть, с одной стороны, достаточно большим, чтобы как можно ближе описывать точный базис (который в общем случае бесконечен). С другой стороны, число базисных функций должно быть, по возможности, наименьшим, чтобы обеспечить стабильность расчёта и увеличить его скорость. Обычно для решения тех или иных задач используются готовые наборы базисных функций, свойства которых известны.

В программном коде известного программного комплекса *ab-initio* расчетов ФНІ реализован выбор базиса в виде присоединённых плоских волн. Каждый атом при этом окружается некоторой сферой (атомной сферой), внутри которой волновая функция ищется в виде разложения по базису плоских волн так, чтобы вне сферы возможно было «сшить» эту функцию с функцией свободного электрона. В программе ФНІ, кроме того, используется метод псевдопотенциала, позволяющего заменить часть базисных функций на некоторый эффективный потенциал. Такая замена производится автоматически при расчёте. От пользователя требуется лишь выбрать псевдопотенциал требуемого типа. Далее мы будем пользоваться псевдопотенциалами, предлагаемыми по умолчанию в пакете *FN98pseudo*.

В ряде работ было проведено *ab-initio* исследование влияния добавок переходных металлов на электронную структуру и упругие свойства интерметаллидов TiAl и Ti_3Al , широко используемых как упрочняющие нанопокртия. В суперячейке, задаваемой при математическом моделировании структуры интерметаллида (рис. 1), вместо атома Al или атома Ti вводился атом примеси (V , Cr , Mn , Zr , Nb , Mo , Ta).

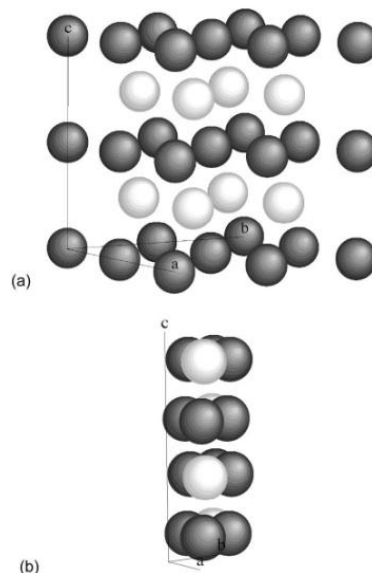


Рис. 1. Суперячейки:

$a - 2 \times 2 \times 2$ для $\gamma\text{-TiAl}$; $b - 1 \times 1 \times 2$ для $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ по векторам a , b и c .
Белые и черные сферы представляют соответственно атомы Al и Ti

Все расчеты проводились с использованием теории функционала плотности из первых принципов (*ab-initio*) суперячейки, содержащей 16 атомов $2 \times 2 \times 2$ для $\gamma\text{-TiAl}$ и $1 \times 1 \times 2$ для $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$.

Ti₃Al. Критерий сходимости для полной энергии - 0,01 мэВ в 350 эВ энергии обрезания. По факту сходимости значения a и c/a были получены в результате подгонки полной энергии по a и c/a третьего порядка многочленов. Объемный модуль был получена путем анализа значений кривой энергий состояний методом Бирч-Мурнагана (4). Упругая константа C_{44} была определена по методу Мехла (5). Результаты исследований механических свойств приведенных интерметаллидов с примесями даны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры решетки (a и c/a), объемный модуль B , упругая константа C_{44} , энергия образования E_{form} в отношении элементов γ -TiAl с введением примеси V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, и Mn (на положения атомов Ti и Al в ячейке (рис. 1, a) были внесены атомы примесей)

	Замена	a (Å)	c/a	B (GPa)	C_{44} (GPa)	E_{form} (eV/atom)
TiAl		4,003	1,014	112	126	-0,401
TiAl (V)	Ti	3,992	1,006	116	128	-0,371
TiAl (V)	Al	4,011	1,003	115	-	-0,342
TiAl (Nb)	Ti	4,001	1,019	117	126	-0,391
TiAl (Nb)	Al	4,022	1,014	115	-	-0,341
TiAl (Ta)	Ti	4,001	1,019	118	127	-0,379
TiAl (Ta)	Al	4,018	1,017	116	-	-0,337
TiAl (Cr)	Ti	3,989	0,999	117	127	-0,339
TiAl (Cr)	Al	4,011	0,994	118	-	-0,336
TiAl (Mo)	Ti	3,992	1,010	120	128	-0,383
TiAl (Mo)	Al	4,019	1,005	119	-	-0,362
TiAl (W)	Ti	3,994	1,010	122	128	-0,361
TiAl (W)	Al	4,021	1,006	121	-	-0,349
TiAl (Mn)	Ti	3,987	0,995	117	-	-0,381
TiAl (Mn)	Al	4,005	0,991	119	118	-0,397

Таблица 2

Параметры решетки (a и c/a), объемный модуль B , упругая константа C_{44} , энергия образования E_{form} в отношении элементов α_2 -Ti₃Al с введением примеси V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, и Mn (на положения атомов Ti и Al в ячейке (рис. 1, b) были внесены атомы примесей)

	Замена	a (Å)	c/a	B (GPa)	C_{44} (GPa)	E_{form} (eV/atom)
Ti ₃ Al		5,772	0,803	114	72	-0,279
Ti ₃ Al (V)	Ti	5,750	0,799	118	71	-0,255
Ti ₃ Al (V)	Al	5,770	0,801	117	-	-0,175
Ti ₃ Al (Nb)	Ti	5,765	0,808	118	68	-0,269
Ti ₃ Al (Nb)	Al	5,785	0,805	116	-	0,059
Ti ₃ Al (Ta)	Ti	5,766	0,808	120	69	-0,265
Ti ₃ Al (Ta)	Al	5,788	0,811	118	-	-0,172
Ti ₃ Al (Cr)	Ti	5,746	0,795	119	67	-0,227
Ti ₃ Al (Cr)	Al	5,761	0,798	119	-	-0,156
Ti ₃ Al (Mo)	Ti	5,757	0,802	121	65	-0,269
Ti ₃ Al (Mo)	Al	5,772	0,807	121	-	-0,275
Ti ₃ Al (W)	Ti	5,758	0,802	124	66	-0,254
Ti ₃ Al (W)	Al	5,774	0,806	123	-	-0,171
Ti ₃ Al (Mn)	Ti	5,744	0,791	119	63	-0,277
Ti ₃ Al (Mn)	Al	5,753	0,797	119	-	-0,207

В работе требуется провести схожие исследования, но применительно не к однородному материалу, а к нанопокрытию, также исследовать взаимодействие различных видов нанопокровтий между собой.

Рассматриваются следующие виды покрытий: AlTiN, TiN, TiC, AlCrN. Требуется оценить их эффективность применительно к задачам механообработки.

Работоспособность металлорежущего инструмента в процессе механической обработки в значительной мере влияет на качество обрабатываемой поверхности за счет изменения контактных условий в зоне резания, стабильности процесса резания, а также на производительность обработки за счет сокращения времени резания (возможности увеличения режима резания) и снижения времени на замену режущего инструмента (увеличение периода стойкости).

В настоящей работе описаны исследования режущих сменных многогранных непереключаемых пластин (СНП), организованные с целью оценки работоспособности режущего инструмента с различными видами наноструктурных покрытий.

Испытания проводились в условиях действующего производства ООО «Нижегородские моторы» специалистами отдела развития технологических процессов и подготовки производства. Были испытаны СНП формы TNMG 220408 из сплава BK8 производства «Кировоградский завод твёрдых сплавов» с различным видами наноструктурных покрытий (пять видов), нанесённых для испытания в вакуумной установке PVD покрытий UniCoat 700 ООО «Элан-практик» (г. Дзержинск).

Таблица 3

Характеристики покрытий

№ п/п	№ опыта	Тип покрытия	Расчётная толщина, мкм	H, ГПа	E*, ГПа	H/E	nIT, %	HV	Адгезия
1	48к АТ	AlTiN	3,1	44	367	0,127	75	4125	HF1
2	54к АТ-Т	AlTiN-TiN ml	3,0	39	326	0,127	74	3686	HF1
3	84к АХ	AlCrN	3,5	42	363	0,122	73	3931	HF1
4	57к АТ-Т	AlTiN-TiN ml	3,5	41	369	0,118	71	3851	HF1
5	6к АТ	(Ti,C)N	3,0	42	317	0,14	78	3932	HF1

Примечание: nIT – инденторная твёрдость; $E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)}$, ГПа – приведённый модуль упругости (E – модуль Юнга, $\nu=0,25$ – коэффициент Пуассона); HV – микротвёрдость по Виккерсу; nIT, % – доля работы упругой деформации (упругое восстановление).

Механические характеристики покрытия (табл.1) измерялись методом наноиндентации образца-свидетеля в соответствии с DIN EN ISO 14577-1 с использованием системы FISHERSKOPE ®H100C. Адгезия покрытия оценивалась по адгезионному тесту Роквелла (стандарт VDI-3198) – индентация образца-свидетеля с покрытием на твердомере Роквелла под нагрузкой 150 кгс и последующей визуальной оценкой результата индетации по шестибальной шкале. Балл HF1 соответствует наивысшей адгезионной прочности.

Испытания образцов проводились на операции токарной обработки детали 31029-1701040 – крышка первичного вала (материал СЧ18 ГОСТ1412-85 – отливка 143-229 HB) (табл. 4). Испытания проводились по известной действующей методике М 37.102.0022. В процессе испытания фиксировалась величина фактической стойкости и износа СНП. Поворот изношенных граней СНП производился по технологическому критерию затупления (при

несоответствии обработанной поверхности заданным параметрам точности и шероховатости). После окончания испытаний проводилась статистическая обработка полученных результатов (табл. 5).

Таблица 4

Данные об операции токарной обработки

Операция	05-токарная с ЧПУ
Обработка	получистовая
Оборудование	Станок токарный с ЧПУ СВ-141
СОЖ	АТМ СОЖ
Обрабатываемый размер	$d116/d82$
Частота вращения шпинделя	$n=380$ об/мин
Скорость резания	$V=100-130$ м/мин
Глубина резания	$a=0,5-1$ мм
Длина обработки	$L_{обр}=32$ мм
Минутная подача	$S_m=57$ мм/мин
Время резания	$T_{рез}=0,56$ мин

Таблица 5

Результаты испытания вариантов покрытий и их математической обработки

№ п/п	Покрытие	Средняя приведённая стойкость, дет./грань	Гарантированная стойкость, дет./грань	Коэффициент стойкости (по сравнению с непокрытым образцом)	Коэффициент вариации средней приведённой стойкости
-	Без покрытия	69	61	1,00	0,09
1	48кАТ AlTiN	312	234	4,54	0,20
2	АТ-Т 54 AlTiN-TiNml -1	189	145	2,75	0,18
3	84кАХ AlCrN	64	55	0,92	0,10
4	57кАТ-Т AlTiN-TiNml -2	185	161	2,68	0,10
5	6кАТ (Ti,C)N	58	48	0,84	0,13

Оценка работоспособности СНП с различными покрытиями осуществлялась на основе сравнения их стойкости со стойкостью СНП без покрытия (рис. 1). Коэффициент стойкости СНП без покрытия принят равным единице.

Малое значение коэффициентов вариации свидетельствует о достоверности и высокой степени повторяемости полученных данных. Значительное повышение стойкости (в 4,54 раза по сравнению с непокрытым образцом) наблюдалось при эксплуатации режущего элемента с покрытием AlTiN (образец №1), а также с покрытием AlTiN-TiNml (образец №2). Снижение стойкости (по сравнению с непокрытым образцом) наблюдалось при эксплуатации режущего элемента с покрытием (Ti,C)N.

Имея достоверные экспериментальные данные, в дальнейшем продолжении данной работы требуется подтвердить их численно, путем математического моделирования, используя квантово-механические расчеты на основе теории функционала плотности.

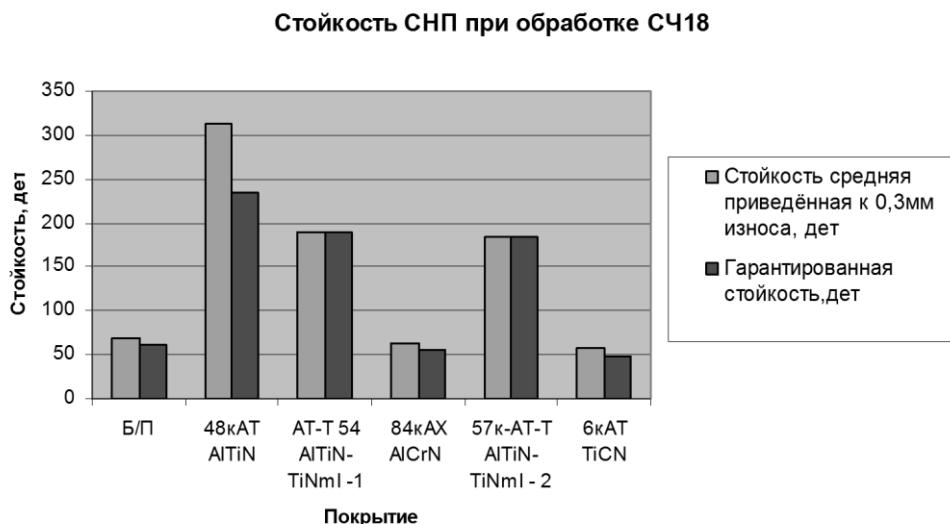


Рис. 2. Стойкость СНП с различными видами наноструктурных покрытий

Следует добавить, что в последние годы в квантовой механике и вычислительной технике достигнут существенный прогресс, получены экспериментальные и теоретические обоснования многих наноявлений (например, эффект ЭПР - Эйнштейна, Подольского, Розена, о запутанности частиц и возможности передачи их информационного состояния). В результате расширены и развиваются теория квантовых вычислений, теория квантовой телепортации, совершенствуются численные квантово-механические методы, развиваются нанотехнологии и т.д. И это развитие происходит в геометрической прогрессии.

Библиографический список

1. Информационные модели наносборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2009. – 212 с.
2. Уолвертон, М. Большая проблема малого // В мире науки и техники. 2009. №2. С. 14.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2013*

S. Sery

MATHEMATICAL MODELING OF NANOSTRUCTURES WITH SPECIFIED PROPERTIES

Komsomolsk-on-Amur state technical university

Objective: To develop the basic concepts of quantum-mechanical calculations of nanoparticles of refractory compounds for use as coatings for cutting tools.

Research: Methodology: evaluation of the functional properties of nanoparticles, their elastic and strength properties that determine the wear resistance of coatings in cutting.

Results of research: The optimum composition of ternary intermetallic compounds, for their use, for use as a wear-resistant coatings for cutting tools.

Key words: nanoparticle, functional properties, wear resistance.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков,
М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ ТВСА РЕАКТОРОВ ВВЭР-300 С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВВЭР-300.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая решетка.

Введение

С момента пуска первого реактора ВВЭР непрерывно совершенствуется ядерное топливо с целью повышения эффективности его использования: для увеличения выработки электроэнергии путем повышения тепловой мощности реактора, обеспечения работы АЭС в широком диапазоне маневренных режимов и др. Характер усовершенствований тепловыделяющихборок для реакторов ВВЭР соответствует мировым тенденциям улучшения топлива водо-водяных реакторов с водой под давлением.

ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены работы по совершенствованию конструкции ТВСА для реакторов ВВЭР. Одним из направлений совершенствования конструкции ТВСА является применение перемешивающих решеток-интенсификаторов (ПР). Основной задачей внедрения ПР является повышение теплотехнических запасов до кризиса теплоотдачи и эксплуатационной надежности за счет выравнивания температур твэлов и снижения локального паросодержания.

Применение ТВСА с перемешивающими решетками в реакторах ВВЭР требует обоснования теплотехнической надежности активных зон и определения влияния конструкций решеток на гидродинамику и массообмен потока теплоносителя.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, с использованием программ, моделирующих процессы в активных зонах. Однако большинство таких программ имеют в своей основе математическую модель, включающую в себя коэффициенты, полученные эмпирическим путем. Поэтому основным методом изучения локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока в сборках твэлов и активных зон реакторов остаются экспериментальные исследования. Надежный теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора требует проведения значительного комплекса экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в пучках стержней.

Данные задачи решаются на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя в пучках труб на аэродинамическом стенде.

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1).

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Для изучения межъячеечного массообмена в экспериментальной модели применяется метод диффузии примесей [1]. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху физическими свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Пропан подается в характерную ячейку пучка твэлов, после чего отслеживается его распространение по сечениям и длине экспериментальной модели (ЭМ).

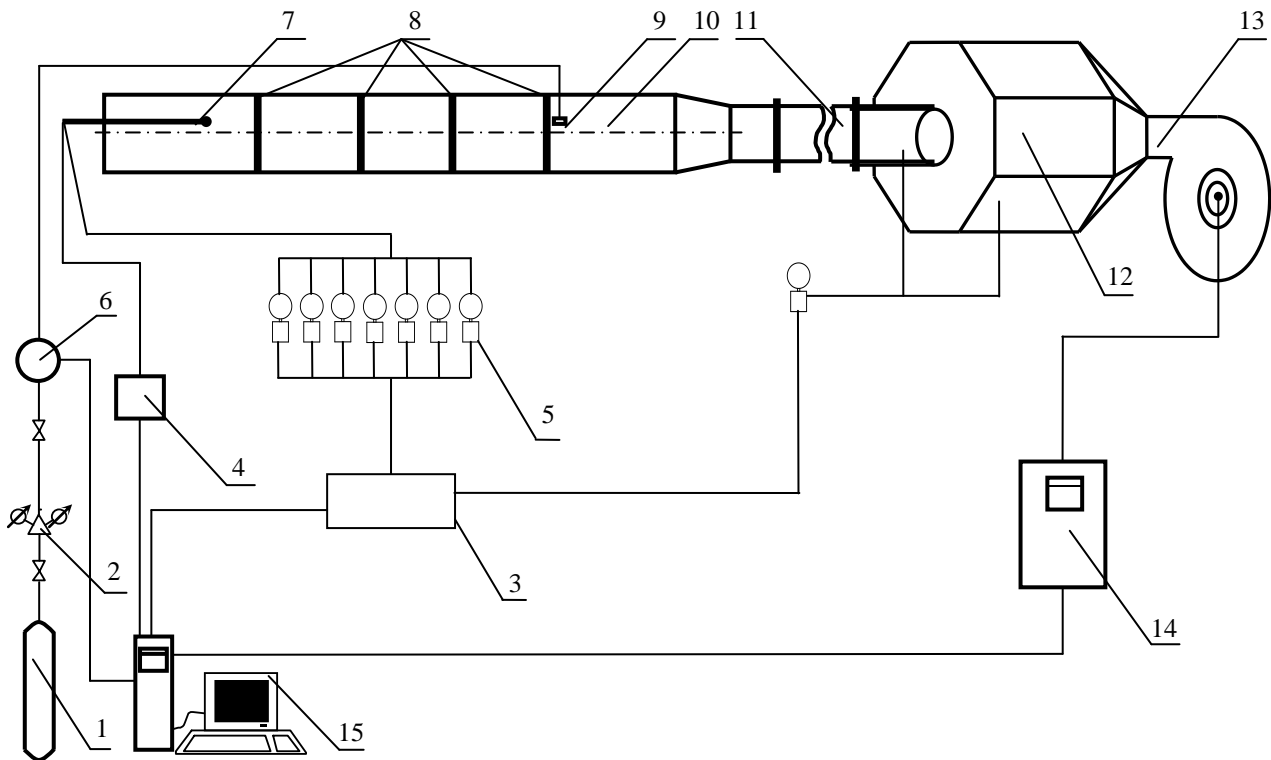


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 4 – модульный газоанализатор; 5 – преобразователи давления САПФИР-22Р; 6 – регулятор расхода газа EL-FLOW; 7 – отборный зонд; 8 – статические отборы; 9 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 10 – экспериментальная модель; 11 – успокоительный участок; 12 – буферная емкость; 13 – вентилятор высокого давления; 14 – преобразователь частоты; 15 – ЭВМ

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВБЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство (рис. 2). Модель выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$ и состоит: из твэлов-имитаторов, направляющих каналов (НК), уголков жесткости, поясов дистанционирующих решеток (ДР) и перемешивающих решеток.

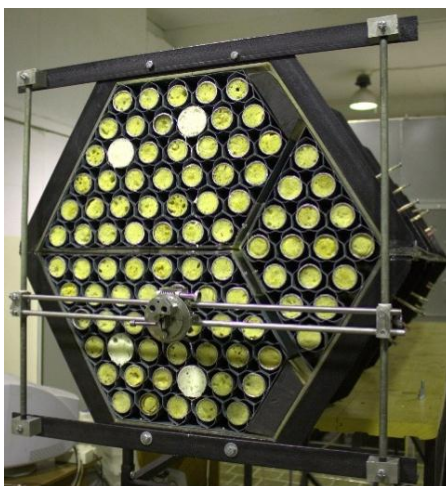
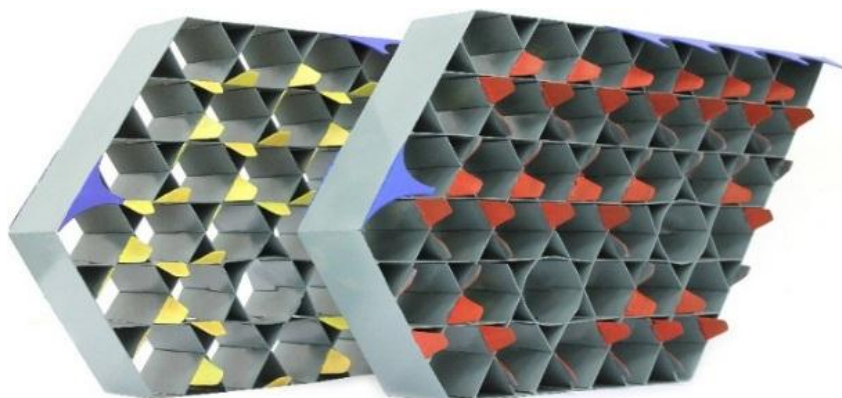


Рис. 2. Экспериментальная модель ТВСА реактора ВБЭР-300

Исследуемый пояс перемешивающей решетки (рис. 3) имеет турбулизирующие дефлекторы высотой 19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора), угол отгиба турбулизирующего дефлектора составляет 30° [2].



**Рис. 3. Пояса перемешивающих решеток
Измерительный комплекс**

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, регулятор расхода газа EL-FLOW, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.



Рис. 4. Газоанализатор АДК-03Р

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, принцип работы которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует одному объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси (рис. 4).

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0,014..0,7 мл/мин до 8..1670 л/мин при давлениях от вакуума до 400 бар. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена заключалась в следующем:

1. Измерения концентраций трассера в экспериментальной модели производились в три этапа:

- а) изучение влияния ПР на течение потока теплоносителя (схема 1, рис. 5);
- б) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении после ПР (схема 2, рис. 5);
- в) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении перед ПР (схема 3, рис. 5).

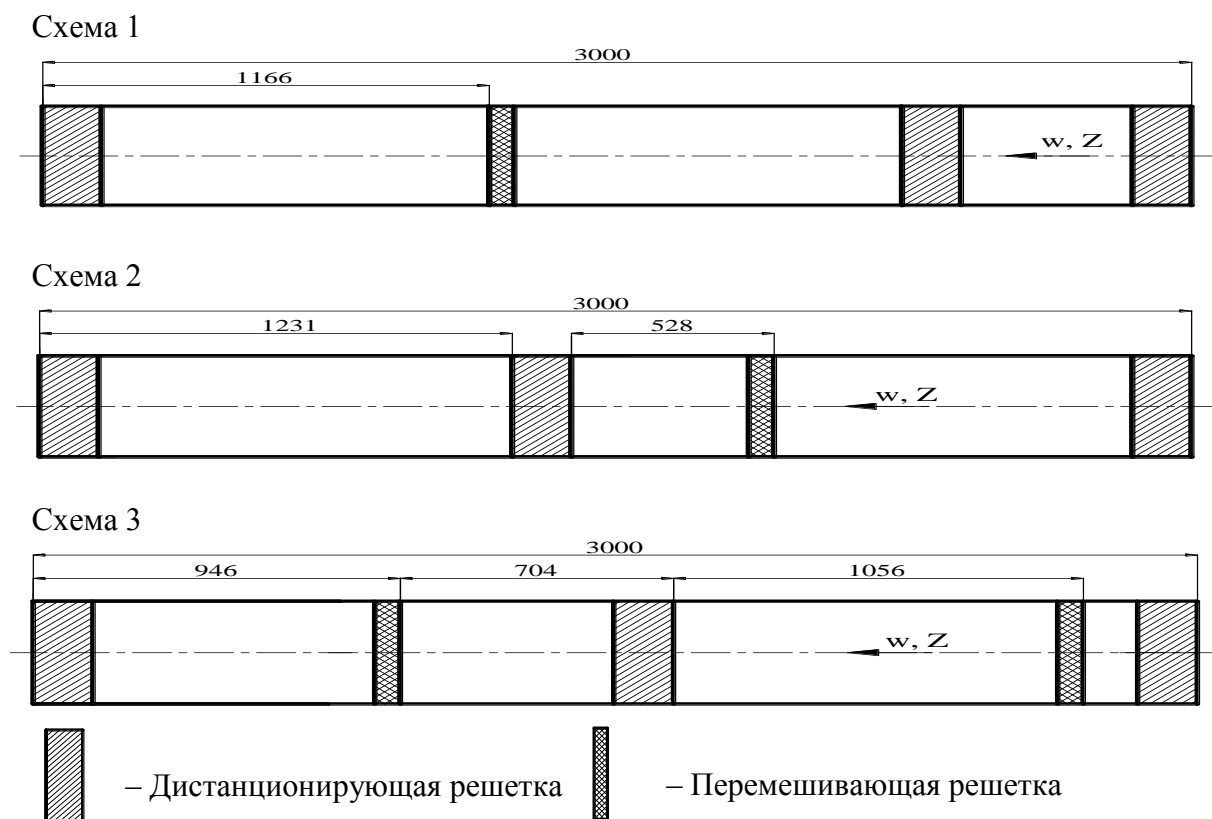


Рис. 5. Схемы расположения ПР и ДР в экспериментальной модели

2. Поперечные сечения экспериментальных моделей были разбиты на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 6).

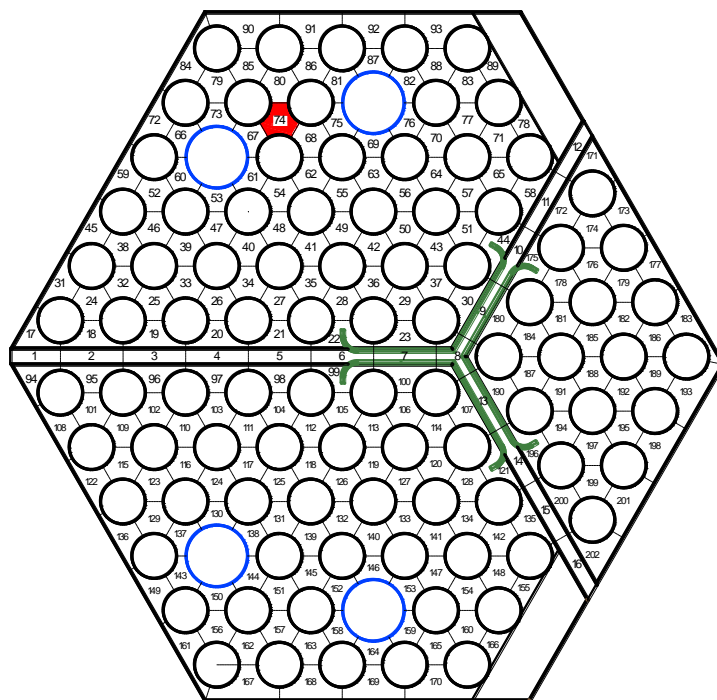


Рис. 6. Расположение зон измерения в поперечном сечении экспериментальной модели

3. Газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемыми поясами решеток в характерных сечениях по длине ЭМ.

4. По полученным данным строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от $8 \cdot 10^4$ до 10^5 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, поэтому полученные результаты можно перенести на натурные условия течения теплоносителя в активных зонах со штатными ТВСА.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований было подтверждено, что в области автомодельного течения теплоносителя коэффициенты гидравлического сопротивления перемешивающих решеток ЭМ соответствуют коэффициентам гидравлического сопротивления натуральных решеток и составляют $\xi_{\text{ПР}} = 0,55$.

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента активной зоны реактора ВБЭР-300 при различных схемах постановки перемешивающих решеток

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке одной ПР позволил сделать следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов (рис. 7).

2. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляет-

ся посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Затухание возмущений массообменных характеристик потока теплоносителя за ПР происходит на расстоянии $\Delta l/d=17\div 18$.

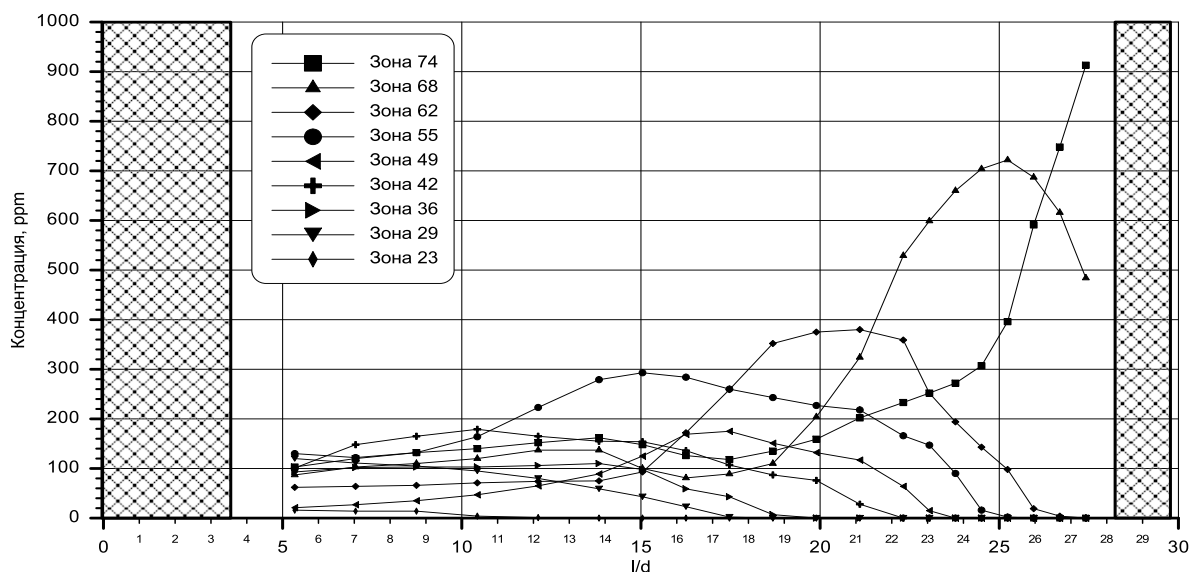


Рис. 7. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

Анализ результатов распределения концентрации пропана в экспериментальной модели при постановке системы ДР после ПР по ходу движения потока теплоносителя показал:

1. Трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой распространился в шестнадцать ячеек (рис. 8) на расстоянии $\Delta l/d \approx 11$ от решетки. Далее за дистанционирующей решеткой происходит постепенное выравнивание концентрации трассера по поперечному сечению модели.

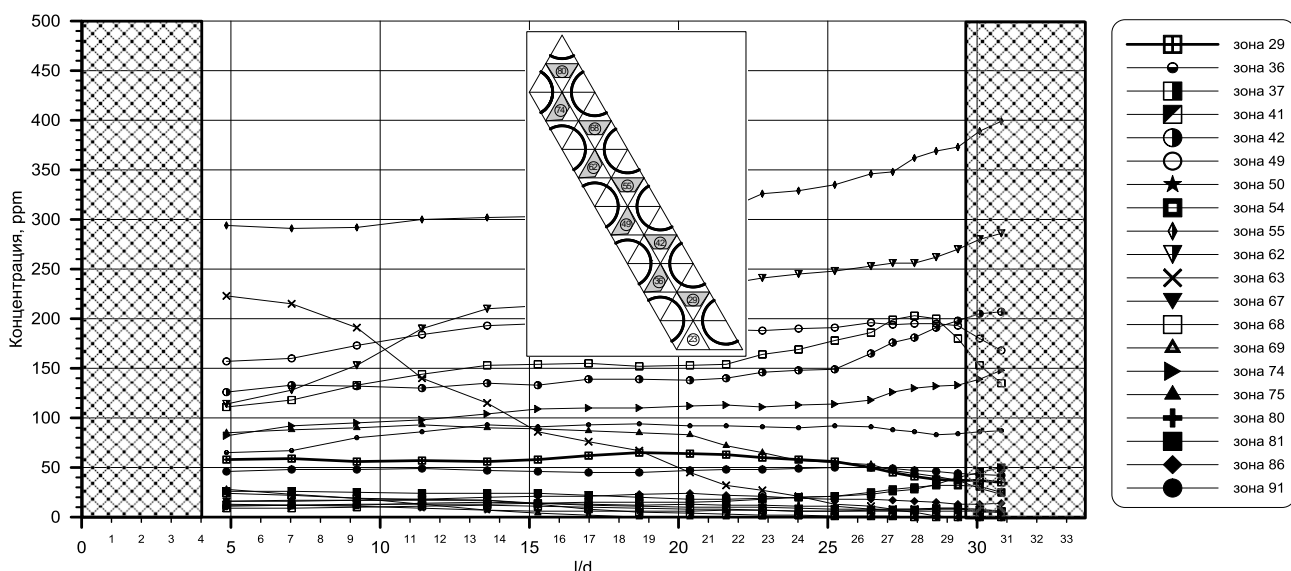


Рис. 8. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой ЭМ

2. За ДР максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой (рис. 10) и далее по длине не переходит в другие ячейки. Это свидетельствует о том, что воздействие дефлекторов на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии. Исходя из этого можно

сделать вывод, что ДР, расположенная после ПР, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

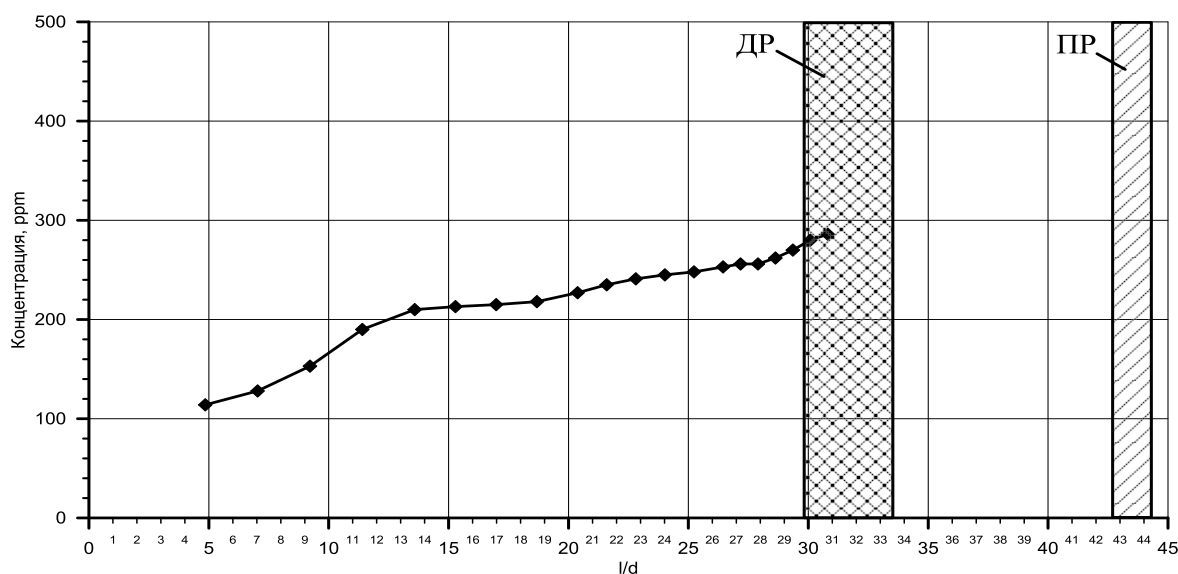


Рис. 9. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за ДР

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке ДР перед ПР по ходу движения потока теплоносителя показал:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов. Это объясняется тем, что отклоненный дефлектором поток приобретает поперечные составляющие скорости на выходе из перемешивающей решетки и далее посредством механизма конвективного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком (рис. 10).

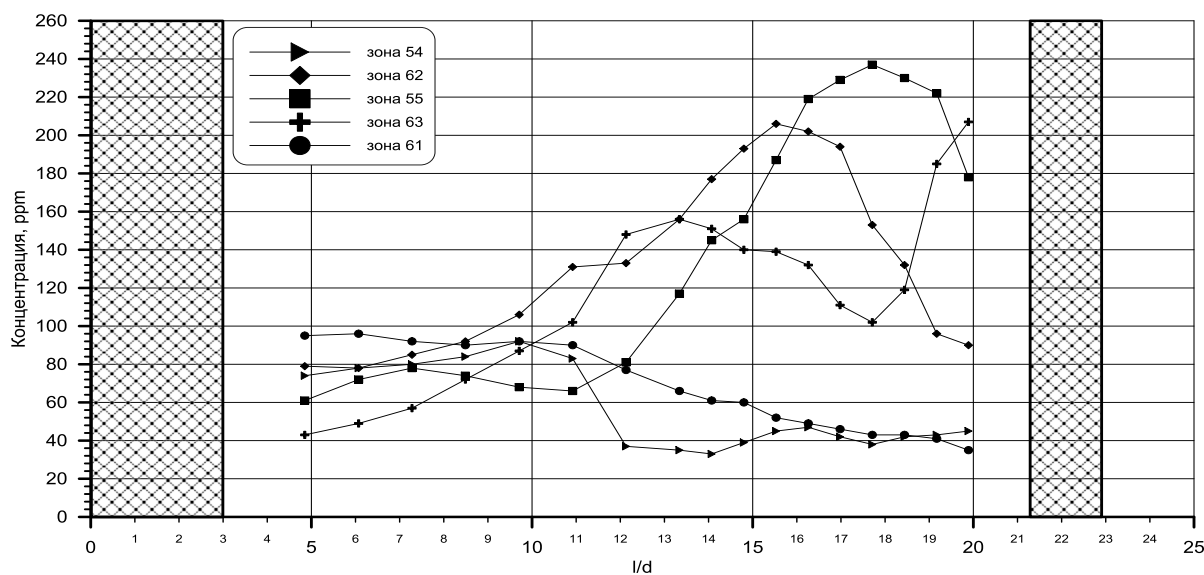


Рис. 10. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

2. Не весь поток теплоносителя движется по направлению дефлекторов, так как часть трассера перераспределяется в соседние ячейки вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. При анализе массообменных характеристик теплоносителя в области НК выявлено, что трассер в данной области распространяется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют дефлектора.

Далее представлены графики изменения относительного расхода теплоносителя за поясом ПР по длине экспериментальной модели (рис. 11).

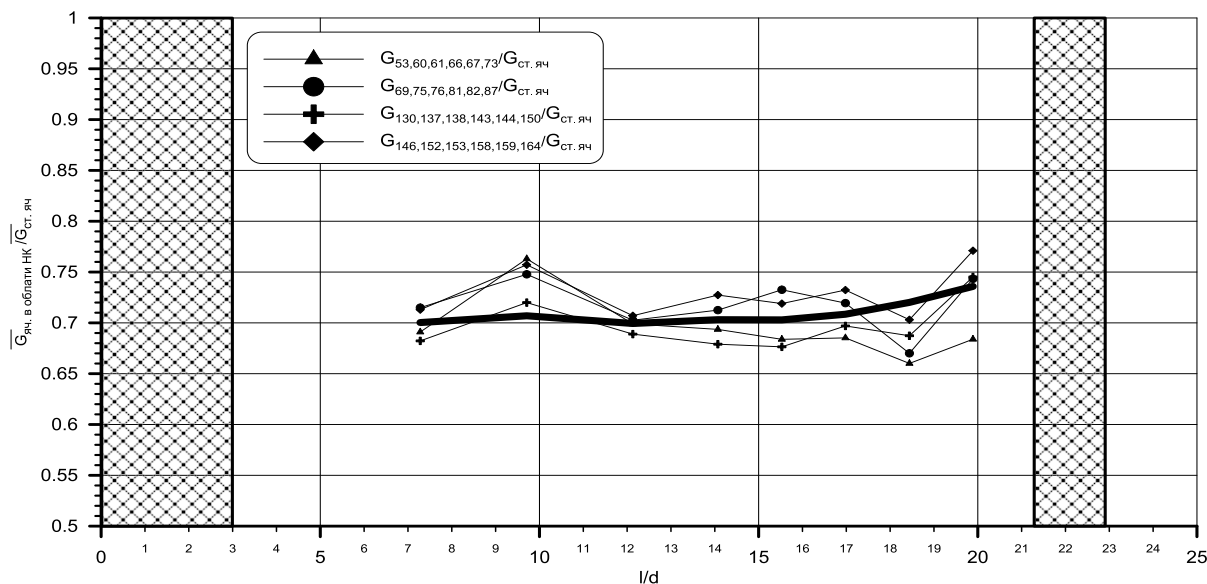


Рис. 11. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к НК, к стандартным ячейкам

Из данного графика видно, что часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25–30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки.

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВСА реактора ВВЭР сделаны следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов. Это объясняется тем, что отклоненный дефлектором поток приобретает поперечные составляющие скорости на выходе из перемешивающей решетки и далее посредством механизма конвективного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком.

2. Не весь трассер движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей решеткой вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

5. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки. Часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов, с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники.

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия – 2012. Т. 113. №5. С. 252–257.
2. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR / С.С. Бородин [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3. С. 106-112.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

**S.M. Dmitriev, A.V. Varentsov, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov,
M.A. Legchanov, A.E. Khrobostov**

STUDY OF COOLANT MASS TRANSFER BEHIND THE VBER-300 FA MIXING GRIDS IN ORDER TO SUBSTANTIATE THEIR EFFECTIVENESS

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass-transfer of coolant in the VBER-300 nuclear reactor FA.

Design/methodology/approach: The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings: Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in VBER-300 reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid and mixing grid were revealed. Experimental researches of local velocity fields in standard cells, cells around displacer and peripheral cells of FA allowed to define distribution of coolant expense in FA, what plays important role at calculation of a temperature field in core of the reactor/

Research limitations/implications: The special databank was created basing on the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the VBER-300 reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted and are used now by JSC OKBM Afrikantov.

Originality/value: Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the VBER-300 reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, mixing grid.

УДК 621.039

С. М. Дмитриев, Р. Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ ФРАГМЕНТА КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЕПЛООБМЕННИКА ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования и анализ температурного состояния и характеристик пульсаций температуры теплопередающих стенок, а также потока однофазного теплоносителя в модели коллекторного узла теплообменника.

Ключевые слова: теплообмен, температурное состояние, термопульсации, теплоноситель, коллекторный узел.

Введение

Существенное влияние на ресурс высоконапряженного теплообменного оборудования оказывают гидродинамические и термодинамические процессы, сопровождающиеся пульсациями температур. Температурные пульсации могут вызывать значительные колебания температурных напряжений теплообменной поверхности, приводящих к усталостному или эрозионному разрушению элементов оборудования [1]. Настоящая работа открывает цикл экспериментальных исследований нестационарного температурного состояния и температурных пульсаций в элементах теплообменного оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ), проводимых в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Работы посвящены выбору оптимальных режимных параметров и конструктивных решений, обеспечивающих снижение уровня пульсаций температур, возникающих в рассмотренной модели теплообменника и, как следствие, надежную эксплуатацию оборудования в течение заданного срока службы, а также созданию банка экспериментальных данных необходимого для расчетного обоснования конструкций теплообменников с применением CFD -кодов.

К числу основных причин возникновения пульсаций температур относятся: кризисы теплообмена, флуктуации мощности источника тепла, смешение неизотермических потоков, колебания уровня и пр. Существенным фактором, влияющим на характеристики пульсаций, является характер обтекания теплообменной поверхности. Так, внесение изменения в геометрию канала может привести к существенному снижению интенсивности пульсаций в результате перераспределения полей скоростей и давлений, как в отдельных зонах, так и в рассматриваемой области в целом.

Целью данной работы является исследование нестационарного температурного состояния и статистических характеристик пульсаций температур коллекторного узла теплообменника при различных вариантах обтекания теплообменной поверхности при низких массовых скоростях принудительного движения теплоносителя.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследования

Экспериментальные исследования проводились на теплогидравлическом стенде ФТ-80, входящем в состав экспериментальной базы кафедры «атомные, тепловые станции и медицинская инженерия». Стенд представляет собой три гидравлически замкнутых контура имитирующих транспортную энергетическую установку. По первому контуру циркулирует греющий теплоноситель, по второму рабочее тело, по третьему – охлаждающая вода. В качестве теплоносителя и рабочего тела использовалась вода высокой степени чистоты. Кон-

струкция стенда позволяет проводить исследования в диапазоне режимных параметров, соответствующих современным ЯЭУ.

Экспериментальный участок включен в состав первого и третьего контура стенда. Общий вид экспериментального участка представлен на рис. 1.

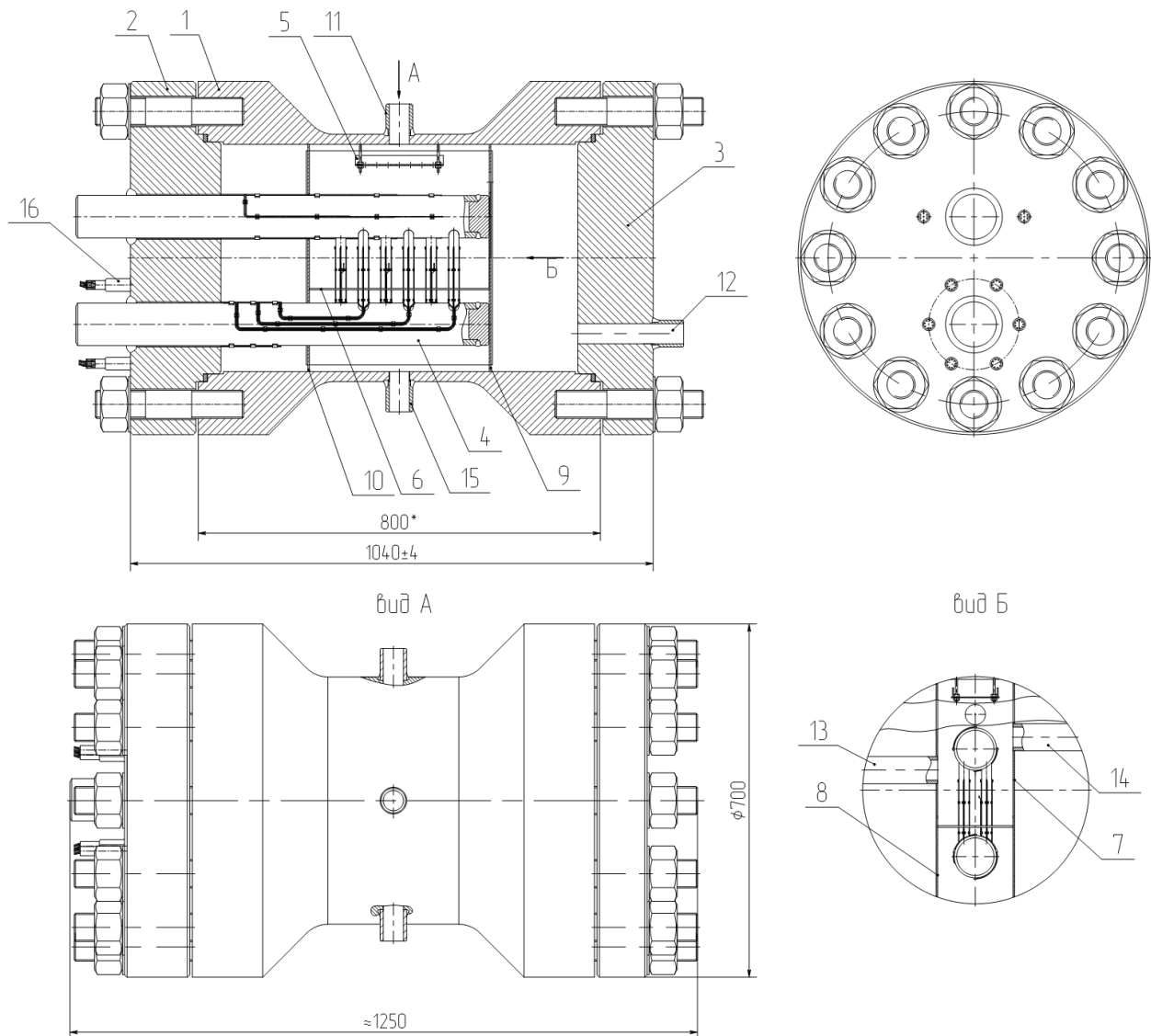


Рис. 1. Общий вид модели теплообменника

Исследуемая модель состоит из следующих основных элементов:

- корпуса (поз. 1);
- двух боковых плоских крышек (поз. 2, 3);
- коллекторного узла, образованного из верхнего и нижнего коллекторов, соединенных между собой шестью прямыми трубками $\text{Ø}20 \times 2.5$ мм (поз. 4);
- рассекателя (поз. 5);
- решётки-сопротивления (поз. 6);
- боковых (поз. 7, 8) и торцевых стенок (поз. 9, 10), установленных таким образом, чтобы они образовывали канал прямоугольного сечения, патрубков подвода (поз. 11, 12, 13, 14), отвода питательной воды к исследуемому участку (поз. 15);
- штуцеров вывода термопреобразователей, крепёжных деталей и т.д.

Общая длина модели составляет 1250 мм, диаметр модели – 700 мм. Длина исследуемой части теплообменной поверхности составляет 360 мм, диаметр – 450 мм.

Движение греющего теплоносителя осуществляется в межтрубном пространстве, движение охлаждающей воды – внутри труб. Принцип движения охлаждающей воды – принудительная циркуляция. Нижний коллектор экспериментальной модели является выходом, а верхний – входом охлаждающей воды.

Исследуемый канал в цилиндрическом корпусе теплообменника образуется боковыми прямоугольными плоскими стенками разделяющими внутренний объем корпуса на три части: две боковые полости и центральный канал прямоугольного сечения для размещения исследуемой коллекторной сборки.

В модели теплообменника предусмотрено несколько различных вариантов подвода теплоносителя к коллекторному узлу, для чего теплообменник снабжен четырьмя патрубками, три из которых расположены в центральном сечении модели, а один на крышке корпуса. Таким образом, реализуются следующие варианты подвода:

- 1) верхний подвод;
- 2) правый боковой подвод, расположенный на уровне заделки труб в коллектор;
- 3) левый боковой подвод, расположенный на уровне верхнего коллектора;
- 4) торцевой подвод, имитирующий переливные окна.

Для исследования полей температур в теплообменном аппарате, в модели использовались 63 хромель-копелевых микротермопреобразователя, с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки 0.2°C). Для уменьшения показателя тепловой инерции термопреобразователей хромель-копелевый спай выполнен на поверхности нержавеющей капилляра, а чувствительная часть датчика прокатана до диаметра 0.5 мм. Поскольку, зоны заделки труб в коллекторы и трубные доски часто подвержены разрушению в результате воздействий пульсаций температур, в модели реализованы следующие способы установки термопреобразователей (рис. 2.):

1. $t_{1,3,\dots,47}$ – металлизированные датчики на поверхности теплообменных труб, расположенные в сечении, отстоящем от верхнего коллектора на 20 мм (в четырех диаметрально противоположных точках окружности);

2. $t_{2,4,\dots,48}$ – датчики, установленные в потоке теплоносителя над металлизированными термопарами, расположенными на поверхности теплообменных труб (в четырех диаметрально противоположных точках окружности);

3. $tt_{1,2,3}$ – вынесенные потоковые термопары, установленные над поверхностью теплообменных труб в сечении, расположенном ниже металлизированных.

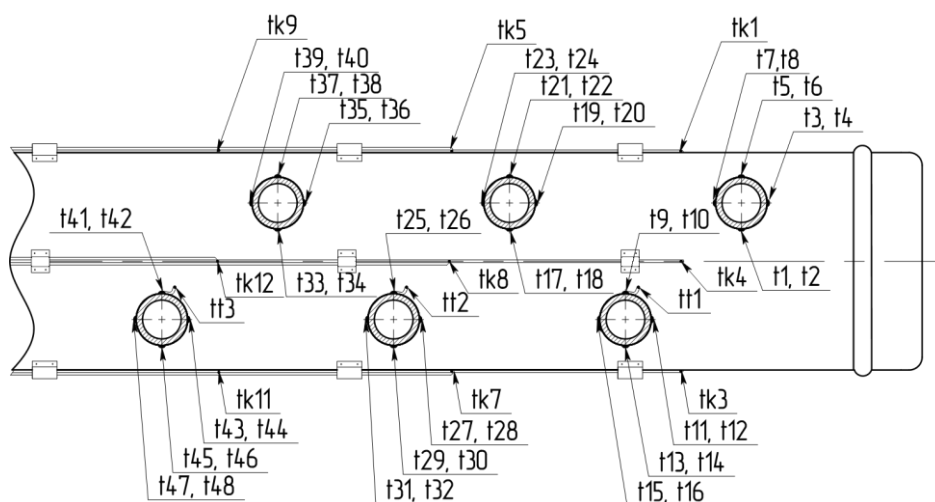


Рис. 2. Схема расположения термопреобразователей в модели

Определение наиболее термически напряженных зон верхнего коллектора осуществлялось при помощи металлизированных термопреобразователей $tk_{1,2,\dots,12}$, установленных на

поверхности верхнего коллектора (в трех сечениях, в четырех диаметрально противоположных точках окружности).

Укрупненно методика проведения экспериментальных исследований заключалась в последовательном выполнении следующих действий:

- осуществление организации циркуляции рабочих сред через экспериментальную модель, посредством коммутации запорной арматуры;
- обеспечение установления и поддержания режимных теплофизических параметров;
- стабилизация теплофизических параметров, ожидание окончания переходных процессов;
- запись временных реализаций температурных полей, расхода греющего теплоносителя и охлаждающей воды, расчет их статистических, корреляционных и спектральных характеристик.

Для достижения поставленных целей на первом этапе данной работы была реализована следующая схема движения теплоносителя: по верхнему варианту подвода теплоноситель попадал в исследуемый канал, омывал коллекторную сборку и, затем, минуя решётку-сопротивление, отводился через патрубок, расположенный в нижней части корпуса модели. На втором этапе исследований для обеспечения выравнивания полей скорости на входе в исследуемый канал был установлен рассекатель и проведены повторные испытания.

На обоих этапах исследования проводились в диапазоне температур 200 – 250 °С, диапазоне расходов 300 – 1100 кг/ч и давлений теплоносителя 9-12 МПа.

Результаты экспериментального исследования

В результате проведенного анализа температурного состояния исследуемой области выявлены следующие особенности:

- величина теплоперепада между входом и выходом теплоносителя выше для режимов без рассекателя. Максимальное значения расхождения составило 7°С на минимальном расходе греющего теплоносителя 300 кг/ч.

Сравнительный анализ распределений температур вблизи и на поверхности теплообменных труб для режимов до и после установки рассекателя позволил сделать следующие выводы:

- при малых расходах теплоносителя (от 300 до 500 кг/ч) наличие рассекателя практически не влияет на характер течения теплоносителя, что проявляется в совпадении показаний большинства термопреобразователей (разность показаний для режима с рассекателем и без рассекателя менее 1°С);
- по мере увеличения расхода теплоносителя от 600 до 1200 кг/ч температурное состояние коллекторного узла для режимов с рассекателем и без рассекателя начинает существенно различаться. Разность между показаниями потоковых, а также металлизированных термопар, установленных на теплообменной поверхности, для этих режимов в основном лежит в диапазонах от 2,5°С и выше. Вероятно, подобный эффект в отсутствие выравнивания полей скорости обусловлен появлением направленных течений отличных от режимов с использованием рассекателя;
- уровень температур, регистрируемых потоковыми термопарами в среднем несколько выше (на 3-5°С) в режимах с рассекателем.

Анализ интенсивности пульсаций температуры позволяет сделать следующие выводы:

- при увеличении расхода теплоносителя первого контура интенсивность пульсаций температур, регистрируемых большинством потоковых и стеночных термопар, установленных вблизи теплообменных труб, возрастает (рис. 3). В то же время интенсивность пульсаций температур, регистрируемая термопарами, расположенными во фронтальной относительно набегающего потока части верхнего коллектора (рис. 4), снижается с увеличением расхода, что наиболее ярко выражено для режимов без рассекателя;
- уровень интенсивностей пульсаций, регистрируемых как стеночными, так и потоко-

выми термопарами, для режимов без рассекателя превосходит аналогичный уровень в режимах с рассекателем в среднем в 1,5 раза. С увеличением расхода эта тенденция становится ярко выраженной.

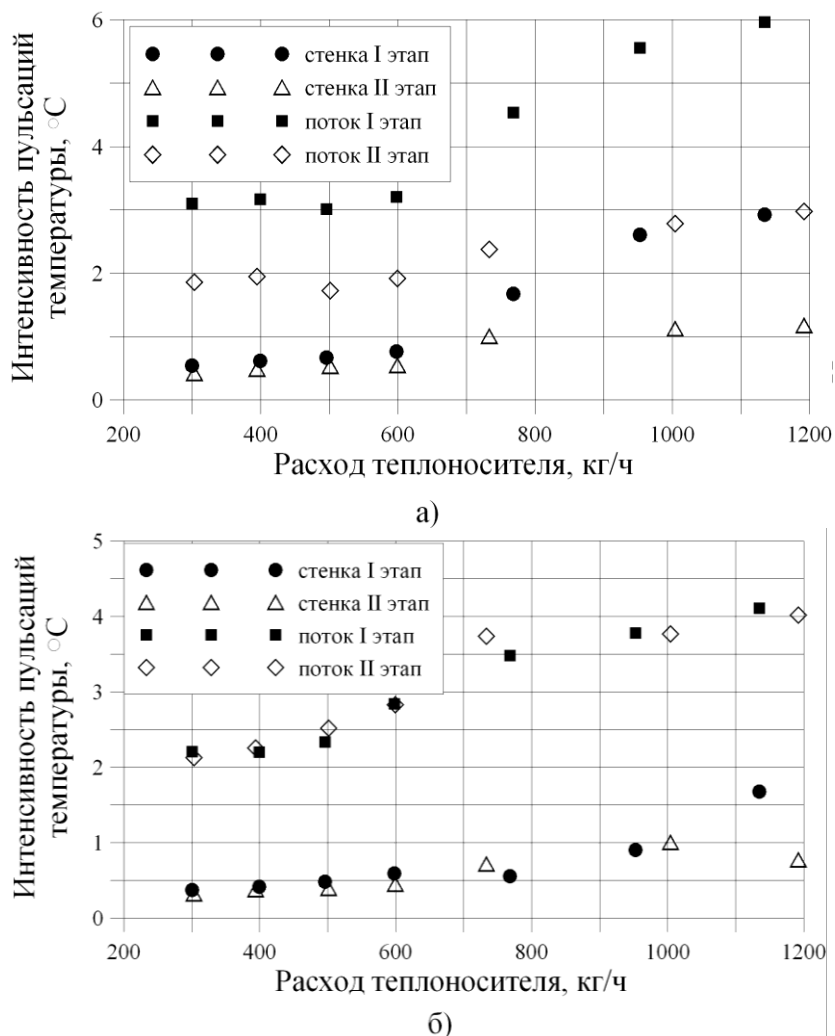


Рис. 3. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры потока и поверхности теплообменных труб от расхода теплоносителя в различных зонах исследуемого канала: а - центральная зона; б - периферийная зона

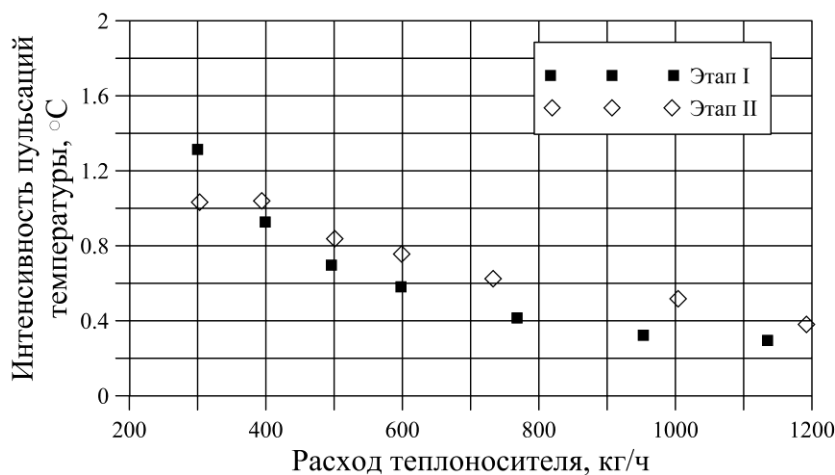


Рис. 4. Характерные зависимости интенсивности пульсаций температуры фронтальной части верхнего коллектора от расхода теплоносителя

Сравнительный анализ спектральных характеристик пульсаций температуры показал, что диапазоны частот, в которых сосредоточена основная энергия спектра, схожи для режимов без рассекателя и после его установки. Однако, режимы без рассекателя характеризуются несколько большими значениями энергии спектров.

Энергетический спектр пульсаций температуры стенки практически на всех реализациях имеет пики в области частот $0,08 \div 0,2$ Гц (рис. 5). Основная энергия спектра сгруппирована в полосе частот от 0 до 0,45 Гц. Установлено, что энергия колебаний температуры зависит от расхода теплоносителя I контура. При этом наблюдаются неравномерность распределения энергии колебаний по периметру теплообменных трубок, что свидетельствует о сложном характере движения теплоносителя. С увеличением расхода теплоносителя количество термопар, регистрирующих пульсации температур, спектры которых имеют пики, уменьшается, что наиболее ярко выражено для режимов с рассекателем.

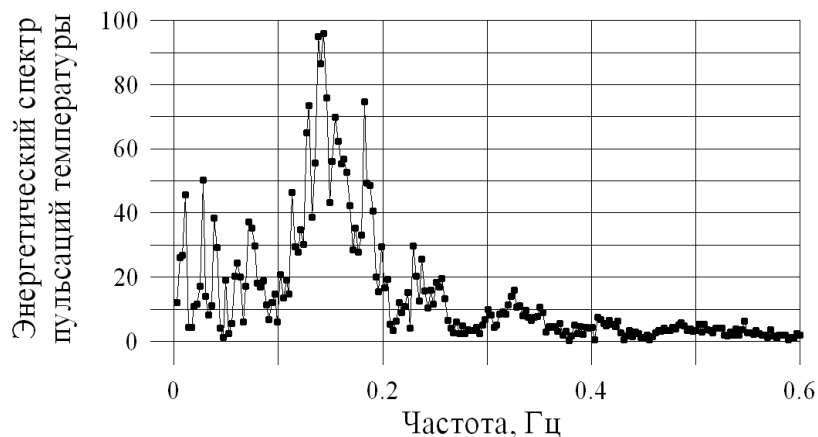


Рис. 5. Энергетический спектр пульсаций температур стенки теплообменной трубки

В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

- определяющим фактором наличия пульсаций как для режимов с рассекателем, так и без него является наличие градиента температур, в результате которого возникают вторичные направленные течения, попеременно омывающие теплообменную поверхность то горячим, то холодным теплоносителем;
- установка рассекателя изменяет характер обтекания коллекторного узла, благодаря чему снижается интенсивность пульсаций температур;
- определяющими для стенок теплообменных труб коллекторного узла являются пульсации температур с частотой от 0,08 до 0,2 Гц.
- увеличение расхода теплоносителя сопровождается исчезновением пиков энергии пульсаций температур теплообменной поверхности, благодаря турбулизации потока в пристеночной области.

Таким образом, с точки зрения снижения пульсаций температур поверхности теплообмена рассматриваемой модели коллекторного узла, эффективно применение рассекателя в диапазоне расходов свыше 600 кг/ч.

Полученные таблицы экспериментальных данных необходимы для верификации теплогидравлических расчетных кодов, используемых для обоснования ресурса и надежности теплообменного оборудования ЯЭУ.

Библиографический список

1. **Судаков, А.В.** Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А. В. Судаков, А. С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.

2. **Рязанов, Р.Р.** Экспериментальное исследование нестационарного температурного состояния модели коллекторного узла теплообменного оборудования ЯЭУ/ Р.Р. Рязанов [и др.] // XVIII Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: сб. ст. – Н. Новгород, 2013.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

S.M. Dmitriev, R.R. Ryazanov, A.E. Sobornov, A.V. Kotin

**STUDY OF THE NON-STATIONARY TEMPERATURE
FIELD AND THERMOPULSATION'S CHARACTERISTICS OF COLLECTOR
UNIT AS PART OF THE NUCLEAR POWER STATION'S HEAT EXCHANGER**

The Nizhniy Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

Purpose: Studying of temperature field of collector unit of the heat exchanger.

Design/methodology/approach: Researches were conducted on heat exchanger model which represents a collector unit assembly placed in the strong body. The surface of heat exchange consists of two collectors connected by six tubes. Measurement of temperature is carried out by 63 microthermocouples. The range of experimental parameters is correspond to range of parameters of working heat exchanger at nuclear power station.

Findings: The results were written in experimental data tables. Experimental dependences of temperature field about coolants mass flow rate are received. The features of a coolant flow motion in considered model are revealed. Range of frequency which includes the thermopulsation's main energy of is determined.

Originality/value: The thermopulsation's characteristics are using for verification of CFD codes.

Key words: heat transfer, coolant, collector unit, temperature's pulsation, temperature field.

УДК 621.039.542

А.В. Безносков, М.В. Ярмонов, О.О. Новожилова, А.Г. Мелузов,
А.Д. Зудин, А.С. Черныш

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПУЧКА ТРУБ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РУ С ТЖМТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена от свинца к стенке при поперечном обтекании коридорного пучка теплообменных трубок в циркуляционном контуре при контролируемых и управляемых процессах массообмена и массопереноса примеси кислорода. Исследования проведены в неизотермическом контуре (в данной статье представлены результаты экспериментов, полученных на теплоотводящем экспериментальном участке, имитирующем условия теплообмена от свинца к стенке с поперечным обтеканием) с циркуляцией свинцового теплоносителя при температуре 450 – 550 °С, средней скорости теплоносителя в узком сечении зазора 0,2 – 1,2 м/с, числе Пекле 500 – 2500.

Исследования проводились при термодинамической активности кислорода в свинце 10^{-3} – 10^0 . Процессы в неизотермическом жидкометаллическом контуре с охлаждающим экспериментальным участком моделируют зависимость характеристик теплообмена от характеристик массопереноса примесей в контуре¹.

Ключевые слова: теплообмен свинцового теплоносителя, технологические обработки контура, термодинамическая активность кислорода в свинце.

Введение

В настоящее время в нашей стране практикуются установки с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовыми и свинец-висмутовыми теплоносителями, проработки таких РУ выполняются и в других странах. Ранее в НГТУ проводились исследования характеристик теплообмена в ТЖМТ в условиях продольного обтекания теплопередающих трубок [1, 2, 3].

Одной из актуальных теплофизических задач является получение экспериментальных и расчетных данных по теплообмену свинцового теплоносителя при поперечном обтекании пучка труб и при регулировании содержания примеси кислорода в реакторном теплоносителе; уточнение критериальных зависимостей теплообмена исходя из эксплуатационного содержания примесей в теплоносителе, включая технологические обработки контура.

Описание экспериментальной установки

Исследования проводились на специально созданном в НГТУ им. Р.Е. Алексеева экспериментальном стенде, в состав которого входит экспериментальная теплофизическая сборка с поперечно обтекаемой поверхностью теплообмена.

Объединенный экспериментальный стенд ФТ-2Б (рис. 1) представляет собой комбинацию двух высокотемпературных жидкометаллических стендов – ФТ-2 со свинцовым теплоносителем и ФТ-1 со свинец-висмутовым теплоносителем.

Стенд включает в себя жидкометаллические насосы, буферные емкости, расходомерные емкости, системы заполнения, очистки и дренажа, газовую систему и экспериментальный участок. Оборудование и трубопроводы, контактирующие со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем, выполнены из стали типа 08X18H10T, имеют электрообогрев и теплоизоляцию. Объем свинцового теплоносителя в контуре – около 0,12 м³, объем свинец-висмутового теплоносителя в контуре – около 0,6 м³. Расход свинца и свинец-висмута контролируется магнитными расходомерами, периодически тарируемыми мерными емкостями.

© Безносков А.В., Ярмонов М.В., Новожилова О.О., Мелузов А.Г., Зудин А.Д., Черныш А.С., 2013.

¹ Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1865.

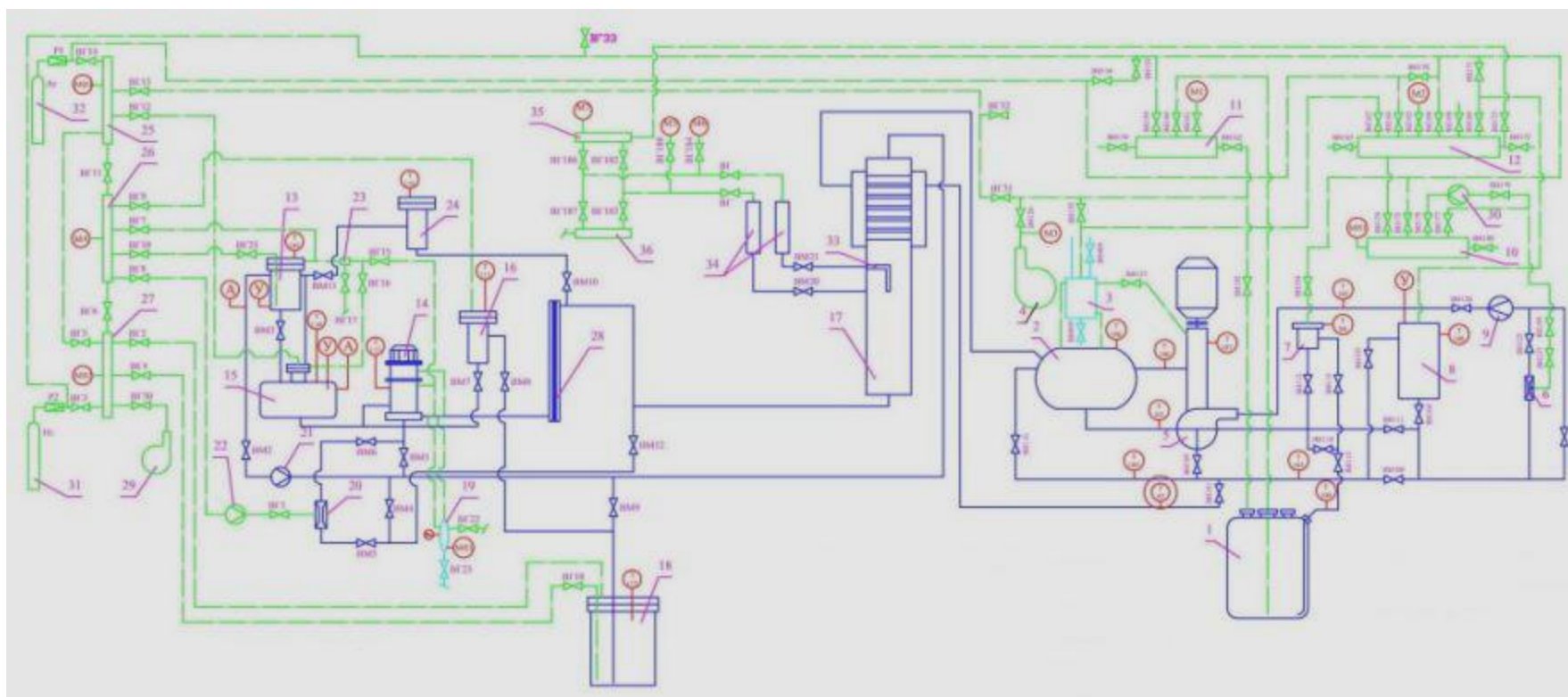


Рис.1. Схема экспериментального стенда ФТ-2Б:

1 – плавильный бак; 2 – буферная емкость; 3 – конденсатор; 4 – вакуумный насос; 5 – ЖМ насос; 6 – эжектор; 7 – фильтр; 8 – мерная емкость; 9 – ЖМ расходомер; 10 – коллектор эжектора; 11 – коллектор плавильного бака; 12 – коллектор низкого давления; 13 – мерная емкость; 14 – ЖМ электронасос; 15 – буферная емкость; 16 – фильтр; 17 – экспериментальный участок; 18 – плавильный бак; 19 – сборник уплотнения; 20 – эжектор; 21 – ЖМ расходомер; 22 – расходомер; 23 – конденсатор; 24 – бак образцов покрытий; 25 – коллектор высокого давления Ag; 26 – коллектор низкого давления Ag; 27 – коллектор H₂; 28 – нагреватель; 29 – компрессор; 30 – расходомер; 31 – баллон H₂; 32 – баллон Ag; 33 – датчик скорости экспериментального участка; 34 – измерительные бачки; 35 – коллектор высокого давления датчиков скорости; 36 – коллектор низкого давления датчиков скорости;

T – датчик скорости; M – манометр; MB – мановакууметр; Y – датчик уровня; A – датчик термодинамической активности кислорода

Содержание кислорода в теплоносителе контролируется – датчиками термодинамической активности кислорода в сплаве. Изменение характеристик электроизолирующих покрытий достигается обработкой теплоносителя газовыми смесями с водородом или кислородом. Отвод тепла в экспериментальном участке для расширения температурного диапазона измерений осуществляется эвтектическим сплавом свинец-висмут, подаваемым от стенда ФТ-1. Данное техническое решение позволяет проводить исследования теплообмена от свинца к стенке без применения водяного контура с высоким давлением. Подогрев охлажденного в экспериментальном участке свинца осуществляется трубчатым электронагревателем.

Экспериментальная модель (рис. 2) представляет собой теплообменную поверхность, выполненную в виде коридорного пучка горизонтальных теплопередающих труб диаметром 17×3 мм из ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ, что соответствует материалу трубок ПГ в проекте ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300. Пучок труб состоит из шести продольных и трех поперечных рядов труб, причем первый и третий поперечные ряды представляют собой имитаторы теплопередающих трубок, выполненные в виде продольно разрезанных труб, размещенных на внутренней поверхности корпуса экспериментального участка. Продольный и поперечный относительные шаги расположения трубок равны 1,47. В проекте парогенератора угол навивки труб пакета составляет 9° , в настоящей модели принято горизонтальное расположение теплопередающих трубок, что идет в запас при теплогидравлических расчетах со стороны свинцового теплоносителя.

Вследствие небольшой длины теплопередающих трубок, составляющей 100 мм, дистанционирующие решетки отсутствуют. Дистанционирование осуществляется раздающим и собирающим коллекторами, в которых заделаны теплопередающие трубки. Корпус теплообменника представляет собой емкость, выполненную в виде канала прямоугольного сечения, что позволяет значительно уменьшить площадь проходного сечения экспериментального участка и соответственно увеличить скорость обтекания теплопередающих трубок свинцовым теплоносителем.

Поступая в экспериментальный участок, свинец проходит через решетку, предназначенную для выравнивания профиля скорости и участок стабилизации потока длиной 1000 мм. Далее свинцовый теплоноситель, омывая теплообменную поверхность, передает тепло эвтектике свинец-висмут, прокачиваемой внутри теплообменных трубок. После чего охлажденный свинец отводится из экспериментального участка.

Температура свинца и свинец-висмута на входе и выходе из модели измеряется погружными термопреобразователями диаметром 1,5 мм. Измерение температуры эвтектики свинец-висмут внутри теплообменных трубок осуществляется микротермопарами, установленными в центральном и выходном сечении теплообменных трубок.

Данные измерения позволяют получить интегральные характеристики теплообмена, которые соответствуют усредненным характеристикам на длине теплопередающей поверхности. Характеристики теплообмена на начальном участке (участке стабилизации) имеют более высокие значения, чем на последующем участке стабилизированного течения, поэтому получаемые выражения дают завышенные значения этих характеристик. Для получения более точных результатов в данных экспериментальных исследованиях проводились измерения локальных характеристик теплообмена, соответствующих характеристикам локальной области поверхности теплообмена вблизи размещения средств контроля температуры потока и контактирующей с ним стенки.

Для измерения температуры теплопередающей поверхности на ней устанавливаются хромель-алюмелевые микротермопары, установленные в центральном сечении под различными углами к набегающему потоку теплоносителя (рис. 3).

Для измерения температуры на "наружной" и "внутренней" поверхностях труб в исследуемых сечениях фрезеруются пазы шириной 1 мм, которые после укладки и зачеканивания микротермопреобразователя металлизуются. Глубина пазов на "наружной" поверхности трубы равняется 1 мм при толщине ее стенки 3,0 мм, а глубина пазов для датчиков, измеря-

ющих температуру ее "внутренней" поверхности, равняется 2,5 мм. Металлизация выполняется методом плазменного напыления в среде инертного газа (аргона). Нанесенные покрытия обрабатываются заподлицо с основной поверхностью. Все термопары имеют индивидуальную градуировочную характеристику с погрешностью градуировки $\pm 0,2$ °С.

Измерение поля температур в высокотемпературном потоке свинцового теплоносителя производится стационарными микротермопарами, установленными в различных сечениях по высоте экспериментального участка, а также термозондом, установленном в поперечном сечении зазора между рядами теплопередающих трубок.

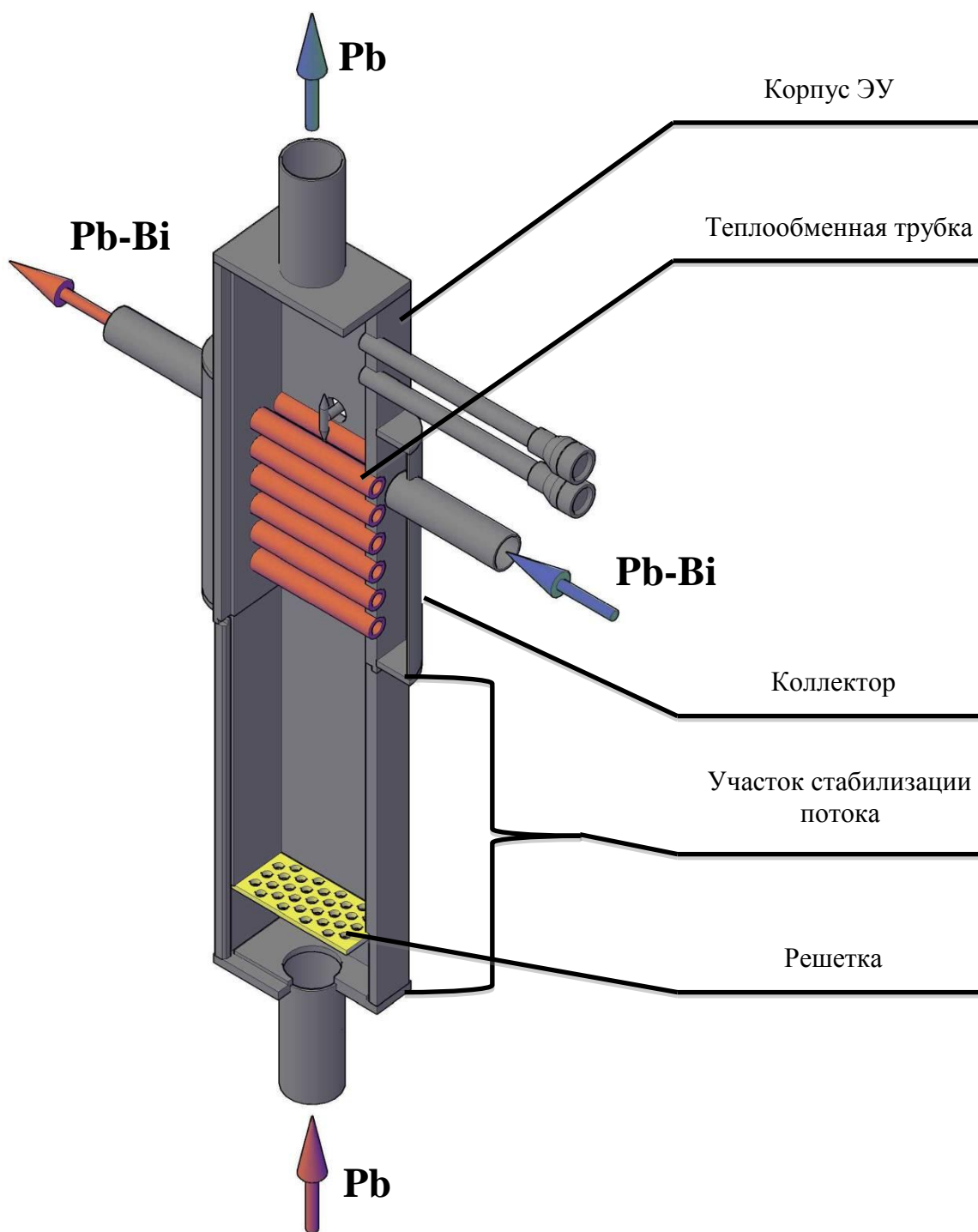


Рис. 2. Схема экспериментальной модели

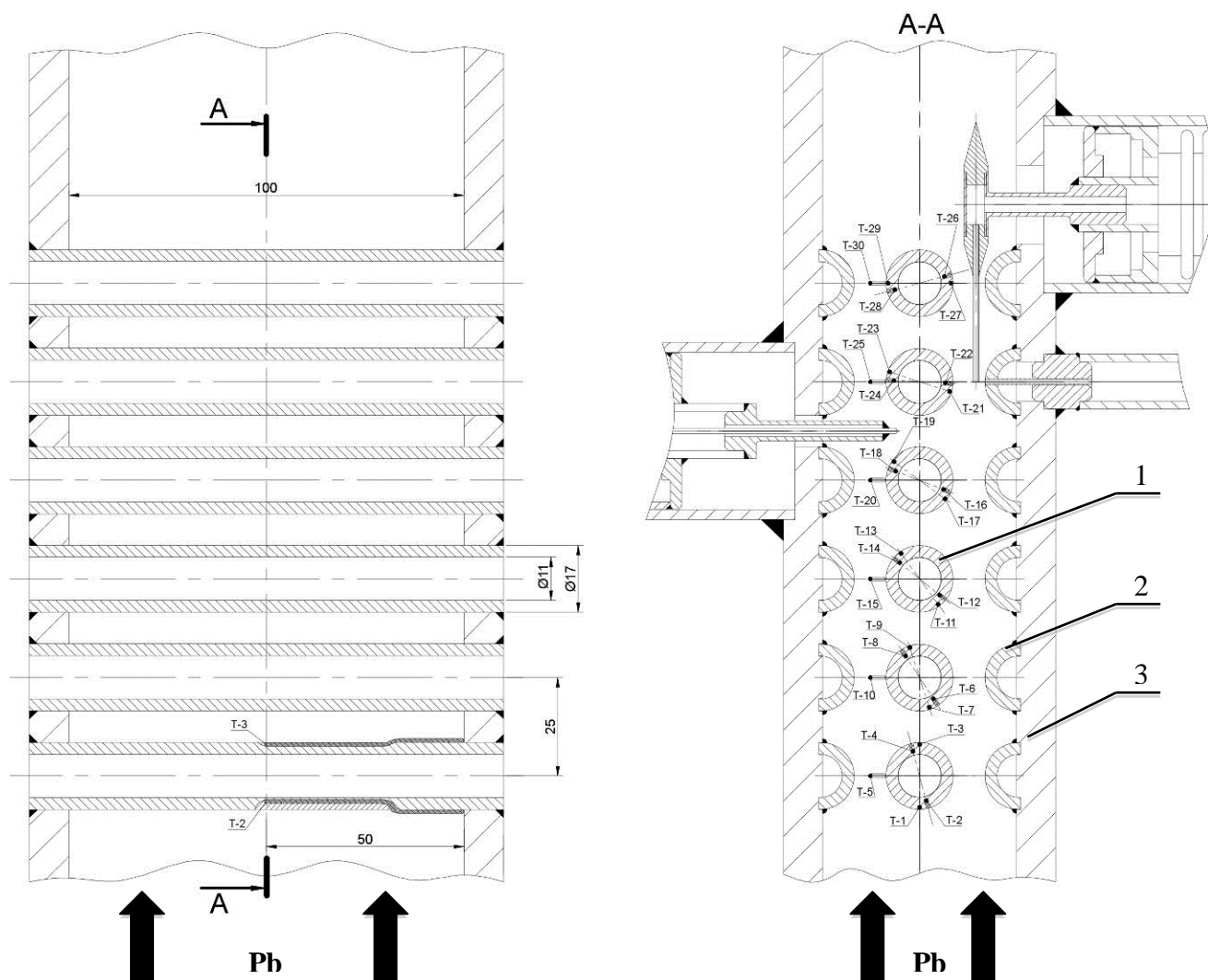


Рис. 3. Схема заделки микротермопар в экспериментальный участок:

1 – теплообменная трубка; 2 – имитатор теплообменной трубки;

3 – корпус ЭУ; Т – микротермопара

Измерение поля скоростей поперек сечения зазора осуществляется датчиком скорости (рис. 4).

Датчик позволяет измерять разность потенциального $H_{\text{пот}}$ и полного напоров $H_{\text{пол}}$ потока жидкого металла. По разности полного и потенциального напора вычисляется осевая составляющая локальной скорости в заданной точке потока. Полный напор измеряется с помощью капилляра (трубки внутренним диаметром $d = 1$ мм, толщиной стенки $\delta = 0,25$ мм), его свободный конец направлен навстречу потоку свинцового теплоносителя. Через капилляр и систему трубопроводов жидкометаллический теплоноситель поступает в бачок измерения полного напора потока. Потенциальный напор измеряется через отверстие в стенке экспериментального участка. Свободный конец капилляра и отверстие для измерения потенциального напора в стенке находятся в одном поперечном сечении трубы экспериментального участка. Через отверстие измерения потенциального напора свинец через систему трубопроводов поступает в бачок измерения потенциального напора.

Измерение разности между полным и потенциальным напорами во время проведения эксперимента осуществлялось следующим образом. Бачки измерения полного и потенциального напоров сообщались по газу. В них создавалось давление газа, при котором в каждом из отжимных бачков устанавливался уровень теплоносителя. После этого электроконтактные стержни перемещались до касания нижнего конца со свободным уровнем жидкого металла

во внутренней полости бочка, при этом срабатывала световая сигнализация и фиксировалось положение электроконтактных стержней. Измеренная разность столбов жидкости в бачках являлась динамическим напором H_d жидкости в текущей точке – оси среза капилляра.

Данные с первичных приборов, установленных на экспериментальных участках, а также с датчиков активности кислорода и магнитных расходомеров собирались и обрабатывались компьютеризированной системой стенда. Программное обеспечение позволяет: получать и обрабатывать данные с разрешением по времени до 0,3 с, рассчитывать теплофизические константы материалов и производить расчет чисел Nu и Re , отображать в реальном времени измеряемые параметры и результаты расчета, сохранять данные.

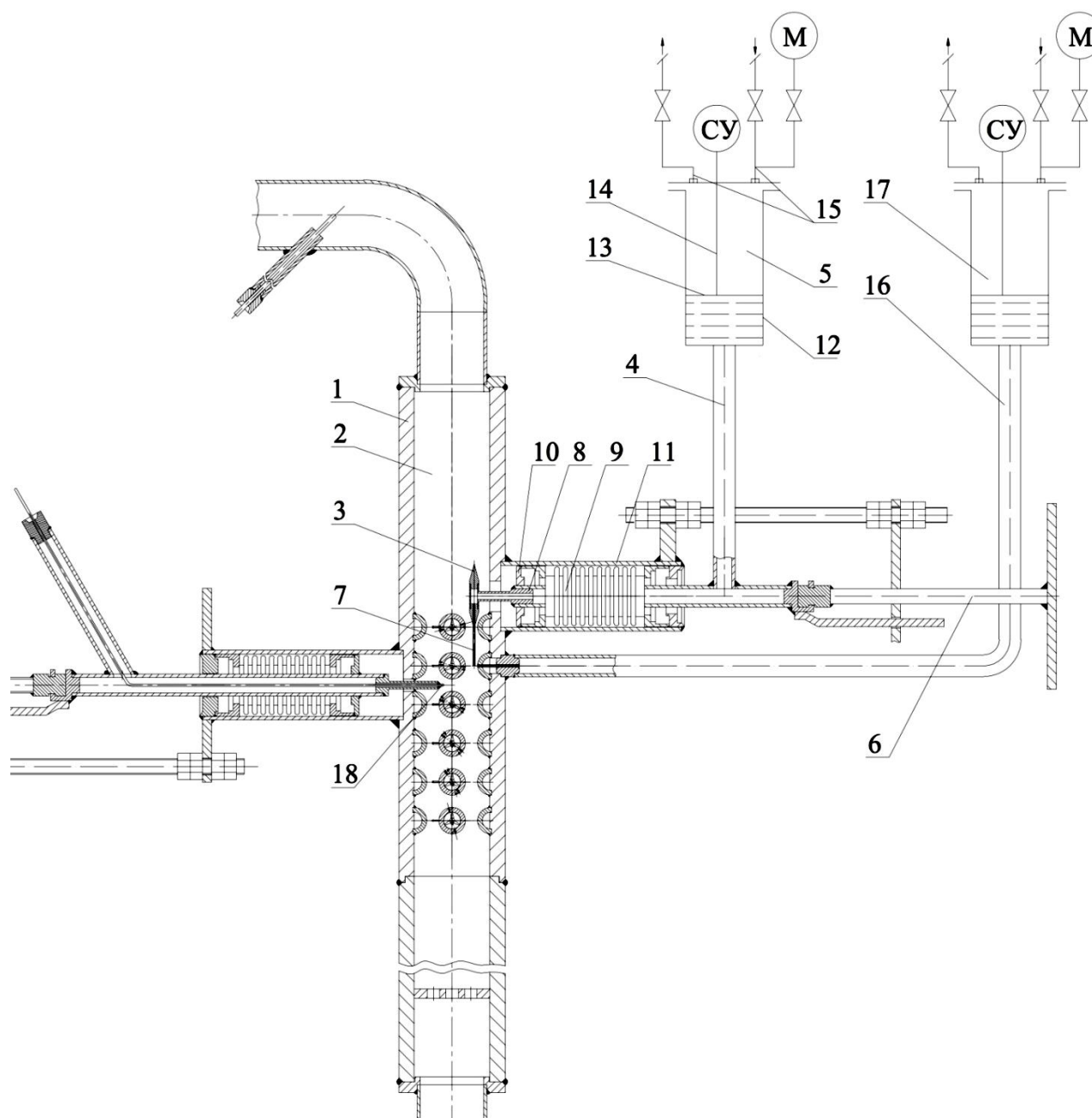


Рис. 4. Датчик скорости:

1 - корпус ЭУ; 2 - поток ТЖМТ; 3 - обтекатель; 4 - канал отбора полного напора; 5 - блок регистрации полного напора; 6 - механизм перемещения; 7 - капиллярная трубка; 8 - измерительный зонд; 9 - сифон; 10 - направляющий фланец; 11 - корпус сифона; 12 - ёмкость блока регистрации давления; 13 - свободный уровень свинца; 14 - электроконтактный сигнализатор уровня; 15 - газовая система; 16 - канал отбора статического напора; 17 - блок регистрации статического напора; 18 - термозонд

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования характеристик теплообмена, а также полей температур и скоростей в потоке ТЖМТ проводились при следующих режимных параметрах: температуре свинцового теплоносителя $T = 450 - 500$ °С; контролируемом и регулируемом содержании примеси термодинамически активного кислорода в сплаве $a=10^{-5}-10^0$; расходе свинца через экспериментальный участок $Q = 3 - 6$ м³/ч, что соответствует скоростям обтекания теплообменных трубок $V = 0,4 - 0,8$ м/с.

Программа испытаний включала в себя следующие этапы:

- обработку методики формирования отложений примеси оксидов свинца на стенках контура и экспериментального участка;
- обработку методик удаления отложений примеси оксидов свинца со стенок контура и экспериментального участка;
- экспериментальное определение зависимости $Nu=f(Re)$ при значениях термодинамически активного кислорода в свинце от $10^{-5} - 10^{-4}$ до 10^0 , а также при формировании слоя отложений примесей на теплопередающей поверхности экспериментального участка. Построение графических и аналитических зависимостей $Nu=f(Re)$ при различном содержании примеси кислорода в теплоносителе и в контуре;
- экспериментальное определение полей скоростей и температур в потоке свинцового теплоносителя;
- экспериментальное определение теплогидравлических характеристик потока ТЖМТ при контролируемой подаче газа в поток теплоносителя;
- ревизию состояния стенда и экспериментального участка.

На протяжении всех этапов эксперимента стенд находился в неизотермическом режиме.

В процессе серии исследований определялись зависимости характеристик теплообмена на участке отвода тепла в следующих повторяющихся режимах:

- с раскислением свинцового теплоносителя за счет подачи «сухого» водорода и с последующей выдержкой в системе газа избыточного давления аргона;
- с окислением свинцового теплоносителя за счет периодической подачи газообразного кислорода с последующей выдержкой в системе газа избыточного давления аргона;
- саморегулирование контура в атмосфере инертного газа;
- очистка двухфазными смесями теплоноситель-газ (водород, аргон).

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментально полученные зависимости $Nu = f(Re)$ при различных значениях термодинамически активного кислорода ($10^0 < a < 10^3$), числа Пекле ($600 < Re < 2500$) и угла φ расположения микротермопар относительно лобовой части теплообменной трубки представлены на рис. 5.

Анализ показывает, что изменение содержания примеси кислорода в теплоносителе не оказывает существенного влияния на характеристики теплообмена, что может объясняться особенностями гидродинамики потока при поперечном обтекании пучка труб. Пограничный слой сильно изменяется по окружности теплообменной трубки. Наименьшая толщина наблюдается на расстоянии 45° от лобовой части трубки, о чем свидетельствует наибольшая интенсивность теплообмена в данной области. Далее происходит нарастание толщины пограничного слоя вплоть до угла $\varphi=90^\circ$, чему соответствует снижение интенсивности теплообмена. Затем, с увеличением угла φ наблюдается скачок интенсивности теплообмена, что может говорить об отрыве пограничного слоя от стенки и возникновении обратных вихревых течений, улучшающих теплообмен в кормовой зоне. Угол отрыва потока от стенки для свинцового теплоносителя составил в данных экспериментальных исследованиях $\varphi = 100^\circ$, что отличается от аналогичных показаний для водяного теплоносителя, где $\varphi = 120^\circ$. Уменьшение угла отрыва потока, вероятно, является следствием того, что свинец в отличие от воды, образуя оксидную пленку, не смачивает поверхность теплообмена. Этот эффект приводит к уменьшению пограничного слоя и, как следствие, к интенсификации теплообмена.

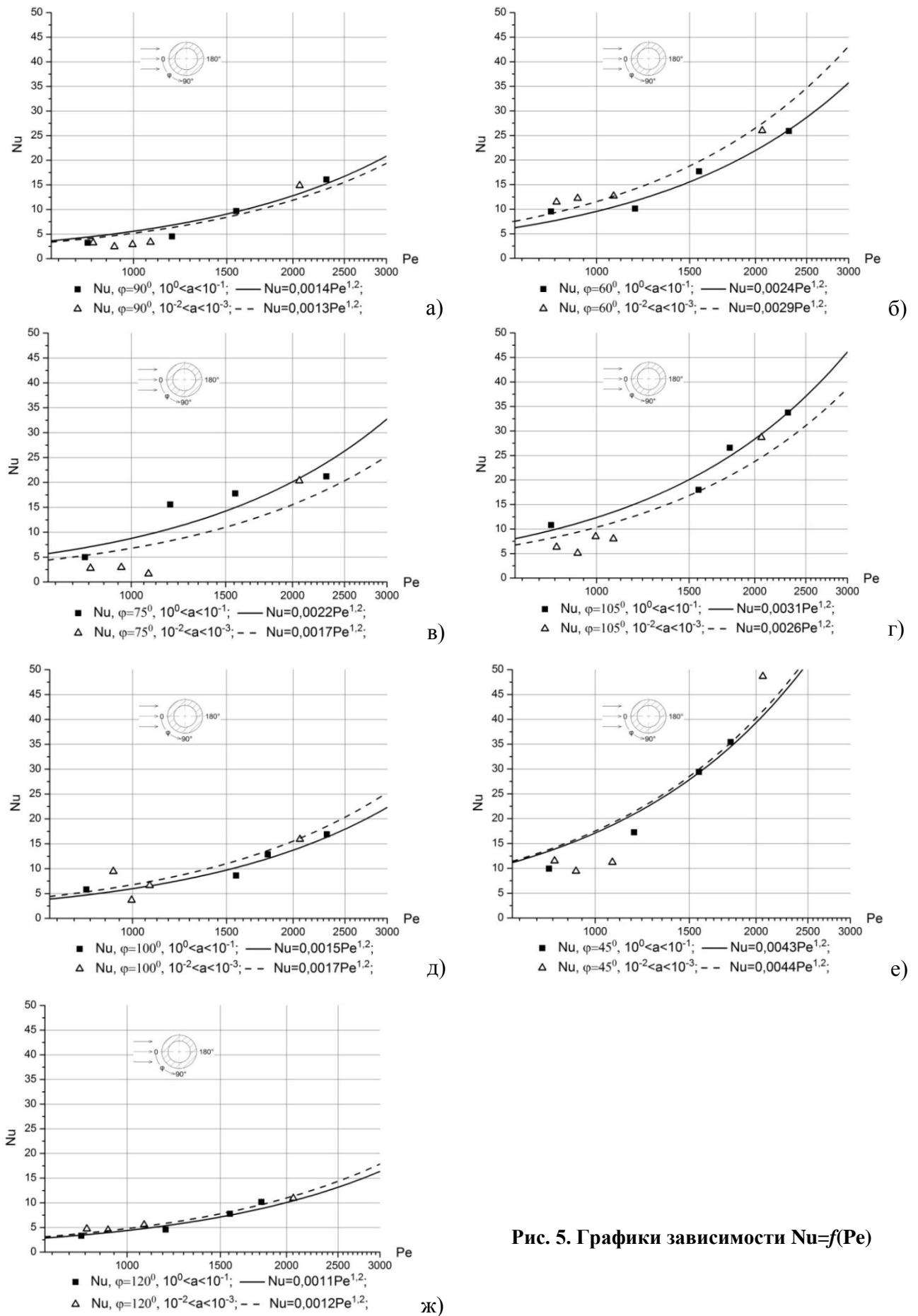


Рис. 5. Графики зависимости $Nu=f(Pe)$

Безразмерные профили температур в потоке свинцового теплоносителя, измеренные в поперечном сечении между рядами теплообменных труб, представлены на рис. 6, а, б, в, г. При оформлении графиков за относительную температуру принято соотношение $\Theta = T/T_{cp}$, (где T – температура, измеренная подвижным термозондом в данной точке потока; T_{cp} – средняя температура потока свинцового теплоносителя, измеряемая стационарными термодатчиками, установленными в узких сечениях между рядами теплообменных трубок, расположенными до и после термозонда; S – текущее положение термозонда).

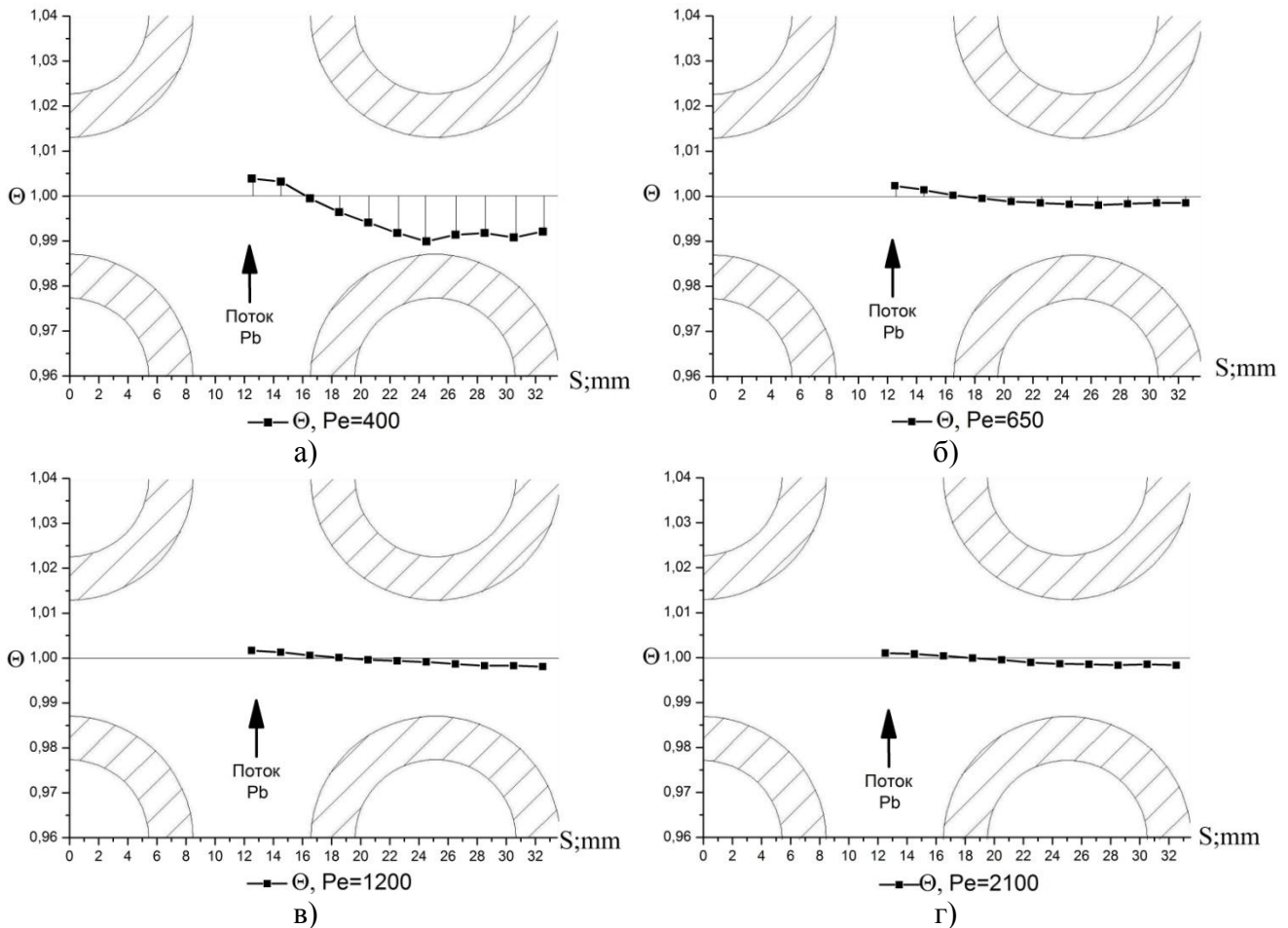


Рис. 6. Безразмерные профили температур

Из анализа профилей температур видно, что при малых скоростях теплоносителя ($Pe=400$) в кормовой и лобовой частях трубок имеется застойная зона, о чем свидетельствует пониженная температура теплоносителя. С увеличением скорости потока теплоносителя ($1200 < Pe < 2100$) безразмерный профиль температуры уплощается, что говорит об увеличении интенсивности перемешивания свинцового теплоносителя за счет интенсификации вихревого движения в кормовой и лобовой областях.

При $Pe=400$ максимальная разница между показаниями температур термозонда составила $6,9$ °C.

При $Pe=650$ максимальная разница между показаниями температур термозонда составила $2,1$ °C.

При $Pe=1200$ максимальная разница между показаниями температур термозонда составила $1,7$ °C.

При $Pe=2100$ максимальная разница между показаниями температур термозонда составила $1,3$ °C.

Следовательно, увеличение скорости обтекания теплообменной поверхности значительно улучшает теплообмен в кормовой и лобовой областях трубки коридорного пакета.

Экспериментально полученные поля скоростей при течении свинцового теплоносителя в узком сечении между рядами теплообменных трубок представлены в виде графических зависимостей $V=f(S)$ (где V – осевая составляющая скорости потока свинцового теплоносителя; S – текущее положение открытого конца трубки полного напора датчика скорости) при различных значения числа Re (рис. 7).

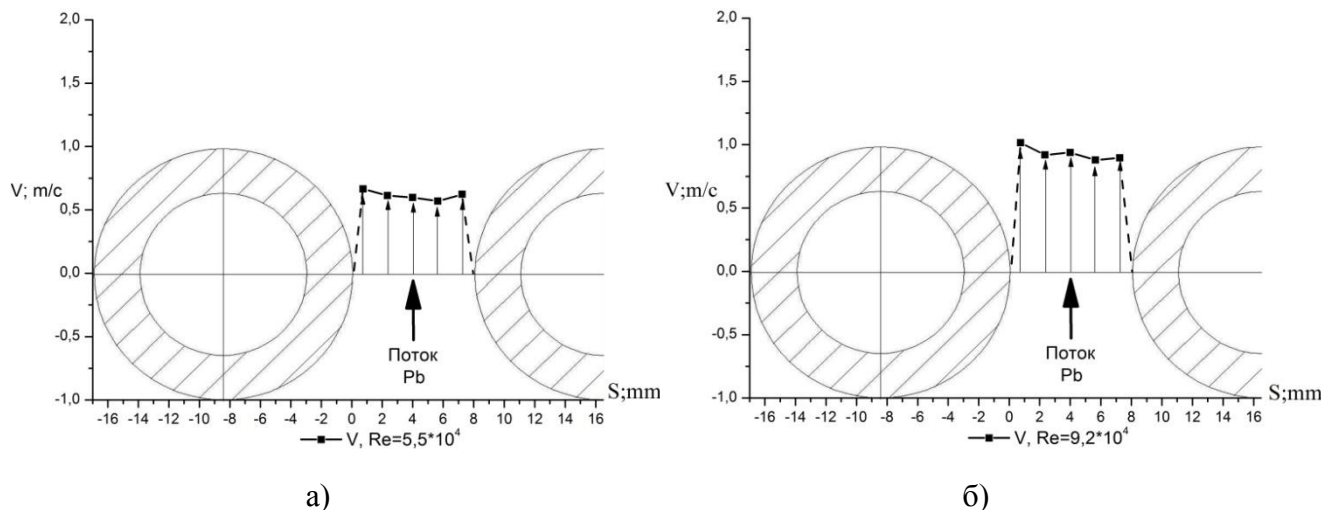


Рис. 7. Безразмерные профили температур

График распределения скоростей по сечению зазора имеет вид уплощенной буквы W . Уплощенная форма может объясняться тем, что пограничный слой, вследствие несмачиваемости поверхности свинцом, имеет очень малую толщину. В результате чего скорости потока вблизи стенки и в центре потока различаются незначительно.

Формирование профиля скорости в виде буквы W , вероятно, является следствием термогравитационного эффекта, возникающего в потоке свинцового теплоносителя в результате наличия градиента температур свинца по высоте экспериментального участка. Так как свинец прокачиваясь через экспериментальный участок в направлении снизу вверх охлаждается, то термогравитационный поток будет иметь встречное направление (сверху вниз). Наложение этих потоков и приводит к формированию W – образного профиля скорости.

Проводились эксперименты по определению характеристик теплообмена в вводимом газе (воздуха, водорода) в поток теплоносителя при регулировании окислительного потенциала теплоносителя.

Экспериментально полученные зависимости температур на внешней T_1 и внутренней T_2 поверхностях теплообменной трубки от времени t при различных значениях расхода газа представлены на рис. 8.

Анализ графиков температур показывает, что при введении в поток теплоносителя газообразного водорода, в диапазоне значений расхода газа ($11,4 \text{ л/ч} < Q_{\text{gas}} < 186 \text{ л/ч}$) происходит резкое снижение температур наружной и внутренней поверхностей теплообмена. Далее температуры резко возрастают, после чего процесс повторяется приобретая пульсацию, циклическую форму с постоянным периодом колебаний $t_k = 14,7 \text{ с}$. Средняя амплитуда колебаний температуры внешней поверхности ($A_{T1} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$) больше, чем внутренней поверхности ($A_{T2} = 3,3 \text{ }^\circ\text{C}$). При прекращении подачи газа амплитуда колебаний температуры снижается, после чего наступает стабилизация показаний температур.

При увеличении расхода газа до $Q_{\text{gas}} = 250 \text{ л/ч}$ сначала возникают пульсации температур, затем при продолжении подачи газа происходит потеря температурного напора в стенке, что свидетельствует о полном прекращении теплообмена через поверхность трубки. При прекращении подачи газа в теплоноситель в стенке начинают возникать и нарастать пульсации температур амплитудой ($A_{T1} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$; $A_{T2} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$) и периодом колебаний $t_k = 14,8 \text{ с}$.

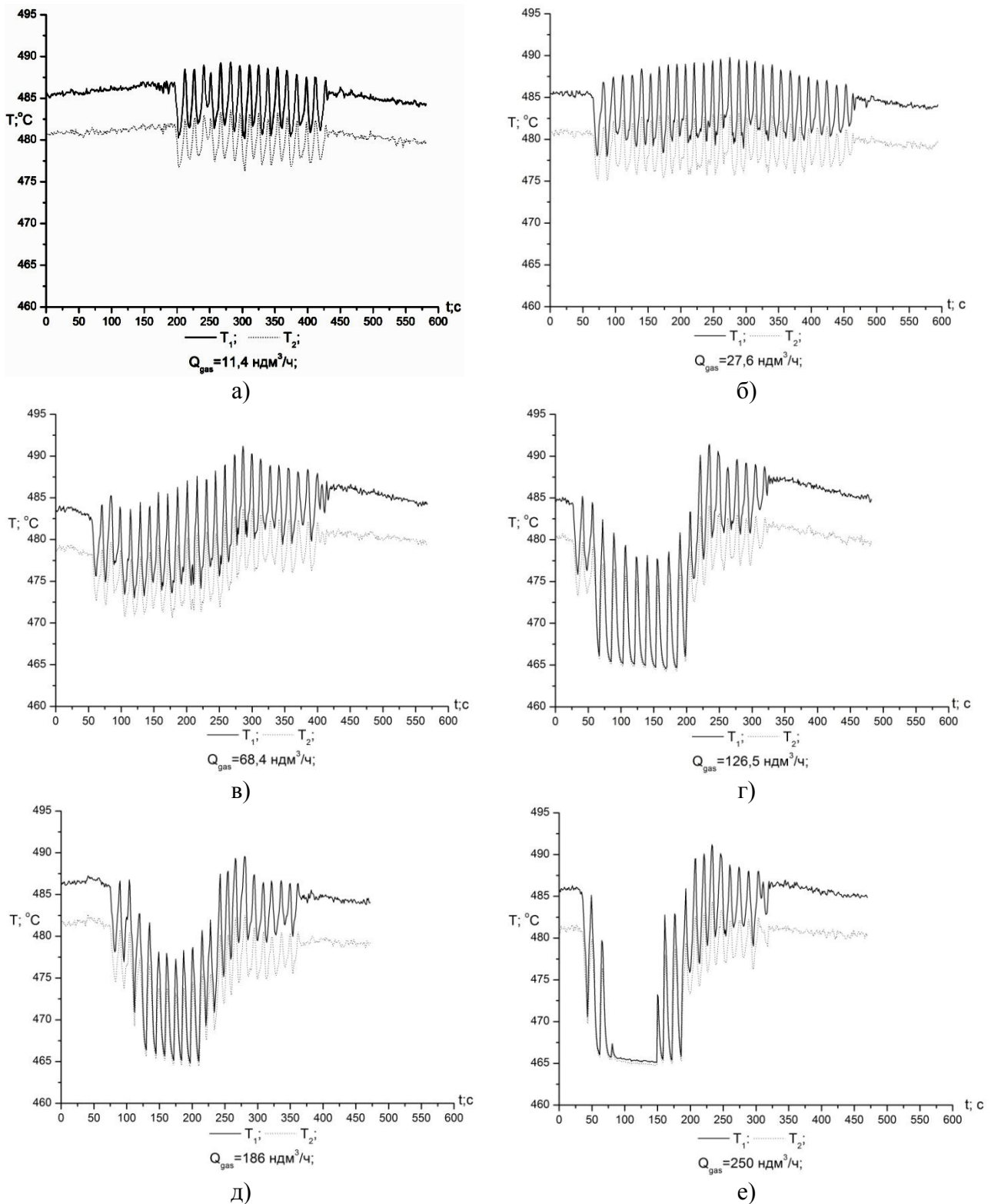


Рис. 8. Графики изменения температуры теплообменной поверхности по времени

Такие циклические колебания температур стенки теплообменной трубки при длительной работе могут привести к накоплению термических напряжений в стенке и, как следствие, к усталостному разрушению теплообменной поверхности.

Заключение

В результате проведенных исследований были впервые проведены комплексные экспериментальные исследования характеристик теплообмена и особенностей обтекания труб

ТЖМТ, и получены зависимости $Nu=f(Re)$ при контролируемом и регулируемом содержании примеси термодинамически активного кислорода $10^{-5}-10^0$. Получены поля температур и скоростей в коридорных пучках труб, а также изучено влияние поступления пара при течи парогенератора или газа при его захвате потоком свинца на характеристики теплообмена, применительно к условиям парогенератора РУ БРЕСТ-300.

На основании полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Изменение окислительного потенциала теплоносителя не оказывает существенного влияния на характеристики теплообмена от свинца к стенке при поперечном обтекании коридорного пучка труб потоком свинцового теплоносителя.
2. Обнаружено уменьшение угла отрыва потока свинцового теплоносителя от теплообменной трубки относительно того же показателя для водяного теплоносителя, что в результате приводит к интенсификации теплообмена.
3. Увеличение скорости обтекания пучка труб также приводит к интенсификации теплообмена вследствие усиления вихревого движения в кормовой и лобовой областях трубок, и выравнивания температурного поля по сечению канала.
4. Обнаружено влияние термогравитационного эффекта на профили скорости в зазоре между теплообменными трубками коридорного пучка.
5. Показано влияние течи парогенератора на теплогидравлические характеристики потока свинца. Предполагается, что длительная работа при течи парогенератора может привести к усталостному разрушению теплообменной поверхности.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование скорости потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя / А.В. Безносков, О.О. Новожилова, С.Ю. Савинов // Атомная энергия. 2009. Т. 106. № 4. С. 234–237.
2. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования процессов теплообмена и профилей температур потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя / А.В. Безносков, О.О. Новожилова, С.Ю. Савинов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2008. № 3. С. 80–90.
3. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование осевой скорости потока свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре с разным окислительным потенциалом / А.В. Безносков, О.О. Новожилова, С.Ю. Савинов, М.А. Антоненков, М.В. Ярмонов // Атомная энергия. 2010. Т. 108. № 3. С. 173–177.

Дата поступления
в редакцию 12.2013

**A.V. Beznosov, M.V. Iarmonov, O.O. Novozhilova, A.G. Meluzov,
A.D. Zudin, A.S. Chernish**

THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF A HEAVY LIQUID METAL COOLANT WHEN THE TRANSVERSE FLOW AROUND THE BEAM PIPE WITH REGARD TO REACTOR POWER PLAN WITH HMLC

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The results of experimental studies of heat transfer from lead to a wall with a transverse flow around a corridor beam of heat-exchange tubes in the circuit under controlled and managed processes of mass transfer and mass transfer impurities oxygen.

Design/methodology/approach: Studies were conducted in the non-isothermal circuit with lead coolant circulation at a temperature of 450-550degC, the average velocity of heat carrier in the narrow section of the gap 0.2 to 1.2 m/s, including the scorching heat of 500-2500. Investigations were carried out by thermodynamic activity of oxygen in the

lead 10^3 - 10^0 . Processes in non-isothermal liquid metal cooling circuit with an experimental plot model the dependence of the heat transfer characteristics on the characteristics of mass transfer of impurities in the circuit.

Findings: The studies were first conducted complex experimental study of the heat transfer characteristics and peculiarities of the flow pipes HLMC, and dependences $Nu=f(Re)$ in a controlled and regulated content of impurities thermodynamically active oxygen 10^5 - 10^0 . Obtained fields temperatures and velocities in the corridor beams, pipes, and also studied the influence of receipt of steam generator leakage or gas capture a stream of lead on the characteristics of heat transfer in relation to the conditions of the steam generator by BREST-300.

Research limitations/implications : Analysis shows that change the content of impurities oxygen in the coolant has no significant influence on the characteristics of heat transfer, which can be explained by the peculiarities of flow hydrodynamics with a transverse flow around the beam pipe.

Originality/value: In the course of experimental and theoretical studies have been resolved thermophysical tasks receipt of experimental and calculation data on heat exchange lead coolant when the transverse flow around the beam pipe and regulation of the content of impurities oxygen in the reactor coolant; and clarify criteria dependences of heat exchange on the basis of the operational content of impurities in the coolant, including technological processing circuit.

Key words: heavy liquid metal coolant, heat-exchange, the thermodynamic activity of oxygen, oxygen content, line bundle.

УДК 621.372.8

Н.А. Новоселова, Л.Г. Рудоясова

О ПОСТАНОВКЕ ОДНОРОДНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ НА УРАВНЕНИЯХ МАКСВЕЛЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что лишь для волновода со сферически симметричными слоями можно строго сформулировать скалярные краевые задачи. При неоднородных средах, образующих направляющую структуру, это можно сделать лишь в отдельных частных случаях.

Ключевые слова: векторные уравнения Максвелла, однородные краевые задачи, граничные условия, тропосферный слой.

Введение

В принципе каждая краевая задача о распространении собственных волн в направляющих электродинамических структурах является векторной, т.е. связана с решением векторных уравнений Максвелла. Однако во многих случаях векторную задачу удастся свести к скалярным краевым задачам относительно независимых скалярных вспомогательных функций, удовлетворяющих уравнению Гельмгольца и естественным физическим граничным условиям: на ограничивающих направляющую (колебательную) структуру поверхностях; на бесконечности, если структура открытая; на границах раздела сред, образующих структуру. Сведение векторной краевой задачи к скалярным обычно называют [1] *разделением уравнений Максвелла*.

Метод разделения уравнений Максвелла позволяет существенным образом упростить процесс нахождения векторов \vec{E} и \vec{H} , когда ограничивающие поверхности и границы раздела сред, образующих электродинамическую структуру, являются координатными в одной из ортогональных криволинейных систем координат: q_1, q_2, q_3 , в которых уравнение Гельмгольца допускает разделение переменных. Рассмотрим несколько вариантов сведения векторных краевых задач к скалярным.

1. Сведение однородных векторных краевых задач к скалярным

В однородной краевой задаче электромагнитное поле удовлетворяет однородным уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -i\omega \mu \vec{H}; \operatorname{rot} \vec{H} = i\omega \varepsilon \vec{E}, \quad (1)$$

которые в произвольной ортогональной криволинейной системе координат: q_1, q_2, q_3 могут быть записаны в виде:

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_3} E_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_2} E_{q_2}) = -i\omega \mu h_{q_2} h_{q_3} H_{q_1}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1} (h_{q_3} E_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_1} E_{q_1}) = i\omega \mu h_{q_1} h_{q_3} H_{q_2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1} (h_{q_2} E_{q_2}) - \frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_1} E_{q_1}) = -i\omega \mu h_{q_1} h_{q_2} H_{q_3}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_3} H_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_2} H_{q_2}) = i\omega \varepsilon h_{q_2} h_{q_3} E_{q_1}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1}(h_{q_3} H_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3}(h_{q_1} H_{q_1}) = -i\omega \varepsilon h_{q_1} h_{q_3} E_{q_2}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1}(h_{q_2} H_{q_2}) - \frac{\partial}{\partial q_2}(h_{q_1} H_{q_1}) = i\omega \varepsilon h_{q_1} h_{q_2} E_{q_3}, \quad (7)$$

где h_{q_1} , h_{q_2} , h_{q_3} – коэффициенты Ляме, соответствующие координатам: q_1 , q_2 , q_3 .

Предположим, что в выбранной системе ортогональных криволинейных координат векторная задача на уравнениях (1) допускает решение вида:

$$E_{q_3} \neq 0; \quad H_{q_3} = 0. \quad (8)$$

В этом случае уравнения (4)-(6) принимают вид:

$$\frac{\partial}{\partial q_1}(h_{q_2} E_{q_2}) - \frac{\partial}{\partial q_2}(h_{q_1} E_{q_1}) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_3}(h_{q_2} H_{q_2}) + i\omega \varepsilon h_{q_2} h_{q_3} E_{q_1} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_3}(h_{q_1} H_{q_1}) - i\omega \varepsilon h_{q_1} h_{q_3} E_{q_2} = 0. \quad (11)$$

Остальные уравнения системы (2)-(7) сохраняют свою запись.

Равенство (9) будет выполняться тождественно, если

$$E_{q_1} = \frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_1}; \quad E_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_2}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в уравнения (10), (11), получаем

$$\frac{\partial}{\partial q_3}(h_{q_2} H_{q_2}) = -i\omega \varepsilon \frac{h_{q_2} h_{q_3}}{h_{q_1}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_1}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_3}(h_{q_1} H_{q_1}) = +i\omega \varepsilon \frac{h_{q_1} h_{q_3}}{h_{q_2}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_2}.$$

Введя обозначения:

$$\bar{u} = \frac{\partial u}{\partial q_3}; \quad H_{q_1} = \frac{i\omega \varepsilon}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2}; \quad H_{q_2} = -\frac{i\omega \varepsilon}{h_{q_1}} \frac{\partial u}{\partial q_1} \quad (14)$$

и подставив их в уравнения (13), нетрудно убедиться в том, что последние будут удовлетворяться тождественно при выполнении условий:

$$h_{q_3} = 1; \quad \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_2}} \right) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_1}} \right) = 0. \quad (15)$$

Подставив (14) в (10), (11), (7), получаем

$$E_{q_1} = \frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_3}; \quad E_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_2 \partial q_3}; \quad (16)$$

$$E_{q_3} = -\frac{1}{h_{q_1} h_{q_2}} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_1}} \frac{\partial u}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) \right].$$

Подставляем компоненты поля, записанные по формулам (14), (16), в уравнения (2), (3), получаем

$$\frac{1}{h_{q_1} h_{q_2}} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_1}} \frac{\partial u}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial q_3^2} + \varepsilon \mu \omega^2 u = 0. \quad (17)$$

При этом учли, что, исходя из (16),

$$E_{q_3} = \varepsilon \mu \omega^2 u + \frac{\partial^2 u}{\partial q_3^2}. \quad (18)$$

Таким образом, векторная краевая задача на уравнениях (1) свелась к решению скалярной задачи на уравнении Гельмгольца (17) относительно функции u с последующим определением компонент поля через эту функцию по формулам (14), (16).

Можно рассмотреть другой вариант краевой задачи на уравнениях (1), когда

$$E_{q_3} = 0; \quad H_{q_3} \neq 0. \quad (19)$$

В этом случае, воспользовавшись принципом перестановочной двойственности:

$$E_{q_i} \leftrightarrow H_{q_i}; \quad \varepsilon \leftrightarrow -\mu,$$

получаем

$$E_{q_1} = -\frac{i\omega\mu}{h_{q_2}} \frac{\partial v}{\partial q_2}; E_{q_2} = \frac{i\omega\mu}{h_{q_1}} \frac{\partial v}{\partial q_1}; E_{q_3} = 0; H_{q_1} = \frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_1 \partial q_3}; H_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_2 \partial q_3}; \quad (20)$$

$$H_{q_3} = \varepsilon \mu \omega^2 v \frac{\partial^2 v}{\partial q_3^2}.$$

При этом функция v удовлетворяет уравнению (17).

Другим возможным вариантом краевой задачи является следующий:

$$E_{q_1} \neq 0; \quad H_{q_1} = 0. \quad (21)$$

В этом случае уравнения (2), (6) и (7) принимают вид:

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_3} E_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_2} E_{q_2}) = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1} (h_{q_3} H_{q_3}) + i\omega\varepsilon h_{q_1} h_{q_3} E_{q_2} = 0; \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_1} (h_{q_2} H_{q_2}) - i\omega\varepsilon h_{q_1} h_{q_2} E_{q_3} = 0. \quad (24)$$

Запись остальных уравнений (2)-(7) сохраняется.

Равенство (22) будет тождеством, если

$$E_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_2}; \quad E_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_3}. \quad (25)$$

При этом уравнения (23) и (24) будут тождественно удовлетворяться, если при введении обозначений:

$$\bar{u} = \frac{\partial u}{\partial q_1}; \quad H_{q_2} = \frac{i\omega\varepsilon}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3}; \quad H_{q_3} = -\frac{i\omega\varepsilon}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2}, \quad (26)$$

выполняются условия:

$$h_{q_1} = 1; \quad \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_3}} \right) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_2}} \right) = 0. \quad (27)$$

Подставив (26) в уравнения (5), (23), (24), получаем

$$E_{q_1} = -\frac{1}{h_{q_2} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right]; \quad (28)$$

$$E_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_2}; \quad E_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_3}.$$

Подставляем (26) и (28) в уравнения (3) и (4). Получаем

$$\frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial q_1^2} \right) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_1} E_{q_1}) = -\varepsilon \mu \omega^2 \frac{\partial u}{\partial q_3} h_{q_1}, \quad (29)$$

т.е. уравнения (3) и (4) оказываются тождественными. С учетом того, что $h_{q_1} = 1$, уравнение (29) переписываем в виде:

$$E_{q_1} = \varepsilon \mu \omega^2 u + \frac{\partial^2 u}{\partial q_1^2}.$$

С учетом выражения (28) для компоненты E_{q_1} получаем уравнение относительно функции u :

$$\frac{1}{h_{q_2} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial q_1^2} + \varepsilon \mu \omega^2 u = 0, \quad (30)$$

аналогичное уравнению (17).

Таким образом, и в случае (21) векторная задача свелась к решению скалярного уравнения (30). Определив из него функцию u , компоненты поля находим по формулам (26), (28).

Задачу для варианта, двойственного с (21):

$$E_{q_1} = 0; H_{q_1} \neq 0, \quad (31)$$

можно сформулировать, используя принцип перестановочной двойственности. При этом компоненты поля выразятся через функцию v , удовлетворяющую уравнению (30), следующим образом:

$$E_{q_1} = 0; E_{q_2} = -\frac{i\omega\mu}{h_{q_3}} \frac{\partial v}{\partial q_3}; E_{q_3} = \frac{i\omega\mu}{h_{q_2}} \frac{\partial v}{\partial q_2}; H_{q_1} = -\frac{1}{h_{q_2} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_2}}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right];$$

$$H_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_2}; H_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_3}.$$

Рассмотрим еще один вариант краевой задачи:

$$E_{q_2} \neq 0; H_{q_2} = 0. \quad (33)$$

В этом случае уравнения (3), (5), (7) принимают вид:

$$\frac{\partial}{\partial q_1} (h_{q_3} E_{q_3}) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_{q_1} E_{q_1}) = 0; \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_3} H_{q_3}) - i\omega\varepsilon h_{q_2} h_{q_3} E_{q_1} = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_1} H_{q_1}) + i\omega\varepsilon h_{q_1} h_{q_2} E_{q_3} = 0. \quad (36)$$

Остальные уравнения системы (2)-(7) сохраняют свою запись.

Уравнение (34) будет удовлетворяться тождественно, если

$$E_{q_1} = \frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_1}; E_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_3}. \quad (37)$$

Подставляем (37) в уравнения (35), (36).

Получаем:

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_3} H_{q_3}) = i\omega\varepsilon \frac{h_{q_2} h_{q_3}}{h_{q_1}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_1};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2} (h_{q_1} H_{q_1}) = -i\omega\varepsilon \frac{h_{q_1} h_{q_2}}{h_{q_2}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial q_3}.$$

Эти уравнения будут тождественно удовлетворяться, если

$$\bar{u} = \frac{\partial u}{\partial q_2}; H_{q_1} = -\frac{i\omega\varepsilon}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3}; H_{q_3} = \frac{i\omega\varepsilon}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_1}; h_{q_2} = 1; \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_3}} \right) = 0; \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_1}} \right) = 0. \quad (38)$$

Подставив (38) в уравнения (35), (6), (36), получаем

$$E_{q_1} = -\frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_2}; E_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_2 \partial q_3}; E_{q_2} = -\frac{1}{h_{q_1} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_1}} \frac{\partial u}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right]. \quad (39)$$

Уравнение относительно функции u получается так же, как в предыдущих вариантах, и имеет вид:

$$\frac{1}{h_{q_1} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_1}} \frac{\partial u}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial q_2^2} + \varepsilon \mu \omega^2 u = 0. \quad (40)$$

Задачу для варианта, двойникового с (33):

$$E_{q_2} = 0; H_{q_2} \neq 0, \quad (41)$$

сформулируем, используя принцип перестановочной двойственности. Компоненты поля, используя формулы (38) и (39), записываем в виде

$$E_{q_1} = \frac{i\omega\mu}{h_{q_3}} \frac{\partial v}{\partial q_3}; E_{q_2} = 0; E_{q_3} = -\frac{i\omega\mu}{h_{q_1}} \frac{\partial v}{\partial q_1}; H_{q_1} = \frac{1}{h_{q_1}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_1 \partial q_2}; \quad (42)$$

$$H_{q_2} = -\frac{1}{h_{q_1} h_{q_3}} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_{q_3}}{h_{q_1}} \frac{\partial v}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_{q_1}}{h_{q_3}} \frac{\partial v}{\partial q_3} \right) \right]; H_{q_3} = \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_2 \partial q_3},$$

где функция v удовлетворяет уравнению (40).

Таким образом, рассмотрели все возможные варианты сведения векторной краевой задачи к скалярным на уравнениях: (17), (30), (40). При этом компоненты полей связаны с решениями этих уравнений соотношениями: (14) и (16) или (20), (26) и (28) или (32), (38) и (39) или (42) соответственно.

2. Краевая задача для двухслойного сферического волновода

Любой сферический волновод естественным образом вписывается в сферическую систему координат, для которой в соответствии с принятыми ранее обозначениями имеем:

$$q_1 = r; q_2 = \Theta; q_3 = \Phi.$$

Соответственно коэффициенты Ляме записываются:

$$h_{q_1} = h_r = 1, h_{q_2} = h_\Theta = r, h_{q_3} = h_\Phi = r \sin \Theta.$$

Как видно, лишь один коэффициент Ляме $h_r = 1$ удовлетворяет необходимому требованию перевода векторной краевой задачи в скалярную. Это соответствует вариантам (21), (31) предыдущей задачи.

Условно две указанные скалярные краевые задачи можно классифицировать как соответствующие волнам E и H . Таким образом, под волнами типа E сферического волновода будем понимать волны, описываемые скалярным уравнением (30) относительно функции u , под волнами типа H – волны, описываемые уравнением (40) относительно функции v .

Можно рассмотреть два варианта двухслойного сферического волновода: 1-й – экранированный волновод, когда на внешней поверхности выполняются граничные условия:

$$E_\Theta(r=R) = 0; E_\Phi(r=R) = 0; \quad (43)$$

2-й – открытый сферический волновод, когда при $r \rightarrow \infty$ накладываются либо нулевое граничное условие, либо условие излучения Зоммерфельда, либо (в предположении существования вытекающих волн) не накладывается никаких граничных условий.

Необходимо помнить, что векторные задачи в предыдущем разделе были сведены к скалярным при условии независимости параметров ε и μ сред, образующих направляющую структуру, от пространственных координат. Следовательно, с помощью уравнения (30) мы можем описывать лишь волны двухслойного сферического волновода, образованного однородными средами. При этом в общем случае (при наличии зависимости поля от обеих угловых координат) необходимо брать оба решения уравнения (30): как относительно функции u , так и относительно функции v .

Действительно, при составлении дисперсионного уравнения на границе между слоями ($r = R_0$) должны выполняться условия непрерывности тангенциальных (по отношению к этой границе) компонент поля:

$$\begin{aligned} E_{\Theta_1}(r = R_0) &= E_{\Theta_2}(r = R_0); E_{\Phi_1}(r = R_0) = E_{\Phi_2}(r = R_0); \\ H_{\Theta_1}(r = R_0) &= H_{\Theta_2}(r = R_0); H_{\Phi_1}(r = R_0) = H_{\Phi_2}(r = R_0), \end{aligned} \quad (44)$$

которые приводят к системе 4-х линейных однородных алгебраических уравнений относительно постоянных интегрирования уравнения (30), записанного для каждой из областей. Равенство числа уравнений и числа неизвестных выполнится только при введении двух скалярных функций u и v , удовлетворяющих уравнению (30) и описывающих совместно волны двухслойного сферического волновода.

Таким образом, можно сделать вывод, что в общем случае волны двухслойного сферического волновода имеют гибридный характер. Дисперсионное уравнение волн как открытого двухслойного сферического волновода, так и экранированного, получается из условия нетривиальности решений системы линейных однородных алгебраических уравнений относительно постоянных интегрирования уравнения (30).

При этом для экранированного волновода краевая задача, будучи однородной, является задачей на собственные функции и собственные значения и описывает собственные волны направляющей структуры. Для открытого волновода в зависимости от граничного условия при $r \rightarrow \infty$ краевая задача может описывать как собственные, так и несобственные волны. В дальнейшем нас будет интересовать открытый двухслойный сферический волновод, как направляющая структура, по своей математической модели соответствующая тропосферному волноводу [2].

Выводы

Как было показано, лишь для волновода с однородными сферически симметричными слоями можно строго сформулировать скалярные краевые задачи. При неоднородных средах, образующих направляющую структуру это можно сделать лишь в отдельных частных случаях, для определенного класса волн. Поскольку тропосферный слой, окружающий Землю, является в принципе неоднородным, в дальнейшем наряду с вариантом двухслойного сферического волновода, образованного однородными средами, будем рассматривать частный подход к исследованию сферического волновода с неоднородным внешним слоем.

Библиографический список

1. Раевский, А.С. К вопросу о расчете спектра волн в неоднородных слоях тропосферы / А.С. Раевский, С.Б. Раевский Н.Д. Хрипков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2000. Т. 3. № 1. С. 5–9.

2. **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

N.A. Novoselova, L.G. Rudoyasova

ABOUT STATEMENT HOMOGENEOUS PROBLEM ON MAXWELL EQUATIONS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Show that only for waveguide with spherically symmetric layers you can strictly define scalar boundary value problems. In heterogeneous environments, form guide structure, this can only be done in certain particular cases.

Methodology/approach: The boundary value problem of wave guides distribute electrodynamic structures is a vector that is associated with the solution vector of Maxwell's equations: vector boundary value problem by Mixing a scalar is commonly referred to as Division of Maxwell's equations.

Findings: In many cases it is possible to make the task a vector scalar provincial objectives concerning independent scalar auxiliary functions satisfying the Helmholtz Equation and natural physical boundary conditions. Several of the options information vector boundary value problems of scalar. Shows that only for waveguide with similar spherically symmetric layers you can strictly define scalar boundary value problems. In heterogeneous environments that form the structure of the Guide, you can do this only in certain special cases, for a certain class of waves.

Originality/value: Because troposphere layer surrounding the Earth, is in principle mixed in along with the option of a 2-layer waveguide formed by spherical homogeneous environments, we will consider a private approach to the study of no uniform waveguide spherical outer layer.

Key words: Vector Maxwell equations, homogeneous boundary value problems, boundary conditions, troposphere layer.

УДК 534.2:621.37

А.В. Данилов, А.А. Радионов

РАСЧЕТ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ НИОБАТ ЛИТИЯ (LiNbO₃)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассчитаны дисперсионные характеристики объемных волн в монокристалле ниобата лития. Показано, что в любом направлении кристалла могут распространяться три волны. При распространении вдоль главной оси симметрии одна из этих волн является продольной, а две другие – квази-поперечными.

Ключевые слова: объемные акустические волны, кристалл ниобата лития, дисперсионное уравнение.

В настоящее время [1, 2] широкое распространение в радиолокации, радионавигации, измерительной технике получили СВЧ-резонаторы, фильтры и линии задержки, работающие на объемных акустических волнах в пьезокристаллах. К достоинствам подобных устройств следует отнести: технологичность изготовления; малые габариты и вес; хорошую сопрягаемость с блоками микроэлектронной аппаратуры: высокую стабильность в процессе эксплуатации и надежность работы, так как они выполняются обычно в виде монокристаллических твердотельных устройств.

Как известно [3, 4], уравнения пьезоакустики имеют следующий вид:

$$\varepsilon_{ik} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} + e_{k,rm} \frac{\partial^2 U_r}{\partial x_k \partial x_m} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = C_{iklm} \frac{\partial^2 U_l}{\partial x_k \partial x_m} + e_{m,ik} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_m \partial x_k}, \quad (2)$$

где обозначено: C_{iklm} , $e_{j,ik}$, ε_{pq} – тензоры упругих пьезоэлектрических и диэлектрических модулей кристалла соответственно; ρ – плотность кристалла.

Решение этой системы уравнений в общем случае представляет собой серьезные математические трудности. В настоящее время его удается выполнить только для плоских монохроматических волн. Решение уравнений (1) и (2) при этом можно представить в виде

$$U_i = U_i e^{i(kn_k x_k - \omega t)} = 0, \quad (3)$$

где U_i – компоненты амплитудного вектора упругих смещений в волне. Для неограниченного кристалла сопровождающее упругую деформацию электрическое поле изменяется синфазно упругим смещениям. Поэтому электрический потенциал выглядит аналогично (3):

$$\varphi = \varphi e^{i(kn_k x_k - \omega t)}. \quad (4)$$

Подстановка (3) и (4) в (1) и (2) дает следующую систему алгебраических уравнений:

$$\Phi (\varepsilon_{pq} n_p n_q) - U_i e_{k,jm} n_k n_m = 0, \quad (5)$$

$$\mathcal{P} \nu^2 U_i - C_{iklm} n_k n_m U_l - l_{m,ik} n_k n_m \Phi = 0. \quad (6)$$

Система (5), (6) является системой уравнений 4-го порядка относительно неизвестных амплитуд $\Phi, U_1 = U_x, U_2 = U_y$ и $U_3 = U_z$. Учитывая, что множитель в круглых скобках

первого слагаемого в (5) представляет собой полную двухкратную тензорную свертку диэлектрических модулей кристалла с вектором волновой нормали \vec{n} , т.е. является скалярным, преобразуем (5) к виду

$$\Phi = \frac{e_{kjm}n_k n_m}{\varepsilon_{pq}n_p n_q} U_i \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) получаем систему трех алгебраических уравнений, относительно компонент амплитудного вектора упругих смещений

$$(\nu^2 \delta_{ie} - Q_{ie})U_l = 0, \quad (8)$$

где $\delta_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = l, \\ 0, & \text{если } i \neq l. \end{cases}$

Величина Q_{il} в системе уравнений (8) образуют симметричный ($Q_{il} = Q_{li}$) тензор второго ранга. Его компоненты определяются равенством

$$Q_{il} = \frac{1}{\mathcal{P}} \left[C_{ikml} + \frac{l_{p,iq}n_p n_q e_k e_m}{(\varepsilon_{pq}n_p n_q)} \right] n_k n_m, \quad (9)$$

где обозначено C_{ikml} , $e_{p,iq}$ (e_k, l_m), ε_{pq} элементы упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических модулей кристалла соответственно;

n_p, n_q ($n_k n_m$) -компоненты вектора волновой нормали \vec{n} .

Записывая условие нетривиальности решений системы уравнений (8) (равенство нулю ее главного определителя), получаем дисперсионное уравнение для плоских объемных акустических волн, распространяющихся в произвольном направлении пьезокристалла:

$$\begin{vmatrix} Q_{11} - \vartheta^2 & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{12} & Q_{22} - \vartheta^2 & Q_{23} \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} - \vartheta^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

После определения из (10) значений скоростей волн $\vartheta^{(j)}$ ($j = 1, 2, 3$, - номер волны) каждое из них подставляем в исходную систему уравнений (5), (6). При этом для каждой волны получаем соотношение между компонентами вектора амплитудных смещений в виде:

$$\frac{U_x^{(j)}}{D_1^j} = \frac{U_y^i}{D_2^j} = \frac{U_z^i}{D_3^j}, \quad (11)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned} D_1^{(i)} &= \begin{vmatrix} Q_{22} - \vartheta^{(j)2} & Q_{23} \\ Q_{23} & Q_{33} - \vartheta^{(j)2} \end{vmatrix}, & D_2^{(i)} &= \begin{vmatrix} Q_{23} & Q_{12} \\ Q_{33} - \vartheta^{(j)2} & Q_{13} \end{vmatrix}, \\ D_3^{(i)} &= \begin{vmatrix} Q_{12} & Q_{22} - \vartheta^{(j)2} \\ Q_{13} & Q_{23} \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

учитывая то обстоятельство, что $U_k^{(i)} = N_k^{(i)} U^{(i)}$ и $N_1^{(i)2} + N_2^{(i)2} + N_3^{(i)2} = 1$,

где $N_k^{(i)}$ - направляющие косинусы, характеризующие поляризацию волны, получаем формулу для определения $N_k^{(j)}$:

$$N_k^{(j)} = \frac{D_k^{(j)}}{\sqrt{D_1^{(j)2} + D_2^{(j)2} + D_3^{(j)2}}}. \quad (13)$$

Правильность определения направляющих косинусов для всей тройки волн можно контролировать условием

$$\vec{N}^{(1)} \cdot \vec{N}^{(2)} = \vec{N}^{(3)} \quad (14)$$

или ему эквивалентными условиями:

$$\vec{N}^{(2)} \cdot \vec{N}^{(3)} = \vec{N}^{(1)}, \quad (15)$$

$$\vec{N}^{(3)} \cdot \vec{N}^{(1)} = \vec{N}^{(2)}. \quad (16)$$

Для упрощения процедуры раскрытия тензорных свертков в (1) и (2) перейдем от тензорной формы их представления к матричной.

Учитывая свойство симметрии модулей упругости $C_{ik} = C_{ki}$, а также равенства выполняющиеся между отдельными компонентами C_{ik} , для кристалла тригональной системы[5]: $C_{22}=C_{11}$, $C_{55}=C_{44}$, $C_{24}=C_{14}$, $C_{56}=C_{14}$, $C_{66} = \frac{1}{2} (C_{11} + C_{12})$, $C_{23} = C_{13}$, матрицу упругих модулей кристалла ниобат лития записываем в виде:

$$C_{ik} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

В итоге имеется всего шесть независимых модулей упругости, значения которых [5] приведены в табл. 1.

Таблица 1

C_{11}	C_{33}	C_{44}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
$2,02 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	$0,607 \cdot 10^{11}$	$0,557 \cdot 10^{11}$	$0,69 \cdot 10^{11}$	$0,0749 \cdot 10^{11}$
$\frac{H}{M^2}$	$\frac{H}{M^2}$	$\frac{H}{M^2}$	$\frac{H}{M^2}$	$\frac{H}{M^2}$	$\frac{H}{M^2}$

Пьезоматрица имеет вид:

$$e_{j,\alpha} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{1,5} & e_{1,6} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & 0 & e_{2,4} & 0 & 0 \\ e_{3,1} & e_{3,2} & e_{3,3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Для кристаллов тригональной системы, класса $3m$, к которым относится кристалл ниобат лития, существует следующая связь между пьезомодулями в (18) [3, 4]:

$$e_{1,6} = -2e_{2,2}, \quad e_{2,1} = -e_{2,2} \quad \text{и} \quad e_{3,2} = e_{3,1}.$$

Таким образом, пьезоматрица (18) для кристалла ниобат лития имеет четыре независимых пьезомодуля, которые имеют следующие значения [5]:

$$e_{1,5} = 3,83 \frac{Кл}{M^2}; \quad e_{2,2} = 2,37 \frac{Кл}{M^2}; \quad e_{3,1} = 0,2 \frac{Кл}{M^2}; \quad e_{3,3} = 1,8 \frac{Кл}{M^2}.$$

Матрица диэлектрических модулей для кристалла ниобат лития имеет вид [3, 4]:

$$\varepsilon_{\beta} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

В (19) элементы матрицы имеют значения [5]: $\varepsilon_1 = 99,5$, $\varepsilon_3 = 38,5$.

Подставляя значения модулей матрицы упругости (17), пьезоматрицы (18) и матрицы диэлектрических модулей (19) кристалла ниобат лития в (9) и раскрывая стандартным образом тензорные свертки, получаем значения модулей в дисперсионном уравнении (10) для объемных акустических волн, распространяющихся в кристалле ниобат лития. При этом выражения Q_{ik} принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{n_1^2 C_{11} + n_3^2 C_{44} + 4n_2 n_3 C_{14} + 2n_2^2 (C_{11} - C_{12})}{\rho} + \frac{n_1^2 [n_3 (e_{1,5} + e_{3,1}) - 3n_2 e_{2,2}]^2}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}; \\ Q_{12} &= \frac{n_1 (n_2 C_{12} + n_3 C_{14})}{\rho} + \frac{n_1 n_2 [n_3 (e_{1,5} + e_{3,1}) - 3n_2 e_{2,2}] [n_1 e_{2,2} + n_3 (e_{1,5} + e_{3,1})]}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}; \\ Q_{13} &= \frac{n_1 n_3 C_{13}}{\rho} + \frac{n_1 n_3^2 e_{3,3} [n_3 (e_{1,5} + e_{3,1}) - 3n_2 e_{2,2}]}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}; \\ Q_{22} &= \frac{n_2^2 C_{11} + n_3^2 C_{44} - 2n_2 n_3 C_{14}}{\rho} + \frac{n_2^2 [n_1 e_{2,2} + n_3 (e_{1,5} + e_{3,1})]^2}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}; \\ Q_{33} &= \frac{n_3^2 C_{33}}{\rho} + \frac{n_3^4 e_{3,3}^2}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}; \\ Q_{23} &= \frac{n_2 n_3 C_{13}}{\rho} + \frac{n_2 n_3^2 e_{3,3} [n_1 e_{2,2} + n_3 (e_{1,5} + e_{3,1})]}{\rho [\varepsilon_1 (n_1^2 + n_2^2) + \varepsilon_3 n_3^2]}, \end{aligned} \quad (20)$$

где обозначено: $\rho = 4,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность кристалла; n_1, n_2, n_3 - проекции волнового вектора в выбранной системе координат.

Задаваясь направлением распространения объемных акустических волн в кристалле ниобат лития, т.е. значениями проекций (n_1, n_2, n_3) волнового вектора n в выражениях (20), находим из решения дисперсионного уравнения (10) фазовые скорости волн, которые распространяются в кристалле в этом направлении. Для волн, распространяющихся вдоль оси z (кристаллографическая ось 3-го порядка симметрии), полагаем $n_1 = n_2 = 0, n_3 = 1$. Решение уравнения (10) дает нам следующие значения скоростей:

$$V_1 = 3593,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_2 = 3593,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_3 = 7145,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Первые две волны *поперечные* (сдвиговые) распространяются в любых взаимно ортогональных направлениях, перпендикулярных оси z .

Третья волна *продольная*, вектор ее поляризации направлен вдоль оси z , а направляющие косинусы $N_k^{(3)}$ имеют следующие значения:

$$N_1^{(3)} = N_2^{(3)} = 0, N_3^{(3)} = 1.$$

Для волн, распространяющихся в любом другом направлении в кристалле, отличном от оси z , для определения волнового вектора n , необходимо проводить преобразование системы координат. При этом связь между направлениями волнового вектора в двух ортогональных системах координат задается табл. 2 [3, 4]:

Таблица 2

	n_1	n_2	n_3
n_1'	α_{11}	α_{12}	α_{13}
n_2'	α_{21}	α_{22}	α_{23}
n_3'	α_{31}	α_{32}	α_{33}

В табл. 2 обозначено n_1', n_2', n_3' – проекции волнового вектора, на координатные оси системы координат x_1', x_2', x_3' , к которой мы переходим от системы координат x_1, x_2, x_3 с проекциями волнового вектора n_1, n_2, n_3 . Откуда имеем:

$$\begin{aligned} n_1' &= n_1\alpha_{11} + n_2\alpha_{12} + n_3\alpha_{13}, \\ n_2' &= n_1\alpha_{21} + n_2\alpha_{22} + n_3\alpha_{23}, \\ n_3' &= n_1\alpha_{31} + n_2\alpha_{32} + n_3\alpha_{33}. \end{aligned} \quad (21)$$

Наиболее простой вид элементы α_{ij} приобретают в том случае, когда поворот от одной ортогональной системы координат к другой происходит вокруг оси z (оси симметрии 3-го порядка) путем поворота на угол θ , отсчитываемый от оси Ox_1 в сторону оси Ox_2 . В этом случае матрица элементов (α_{ij}) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Определим направление волнового вектора для волны, распространяющейся вдоль кристаллографической оси y . В ортогональной системе координат (x_1, x_2, x_3) , связанной с кристаллографическими осями, направим ось x_2 вдоль y . В этом случае имеем $n_1=0, n_2=1, n_3=0$. Ортогональная система отсчета, в которой необходимо решать дисперсионное уравнение (10), получается путем поворота системы координат (x_1, x_2, x_3) вокруг оси x_3 на угол $\theta=2\pi-30^\circ$ в направлении от оси x_1 к оси x_2 . При этом из (21) с учетом (22) получаем $n_1'=0,866, n_2'=+0,5, n_3'=0$.

Результаты решения дисперсионного уравнения (10) для данных волн приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер решения	Скорость волны м/с	$N_1^{(j)}$	$N_2^{(j)}$	$N_3^{(j)}$	
1	$V_1 = 3581,9$	0,04572	0,02637	-0,9986	$\vec{N}^{(2)} \times \vec{N}^{(3)} = \vec{i}0,0458 + \vec{j}0,02638 - \vec{k}0,9986$
2	$V_2 = 6562,1$	-0,5	0,866	-0,000022	$\vec{N}^{(3)} \times \vec{N}^{(1)} = -\vec{i}0,49999 + \vec{j}0,8659 - \vec{k}0,0000209$
3	$V = 3945,015$	0,8648	0,4993	0,05279	$\vec{N}^{(1)} \times \vec{N}^{(2)} = \vec{i}0,86478 + \vec{j}0,4993 + \vec{k}0,05311$

Кроме значений скоростей волн, распространяющихся в избранном направлении в кристалле, в табл. 3 приведены значения направляющих косинусов $N_k^{(j)}$, определяющих поляризацию каждой волны номера (j) , и выполнена проверка правильности определения век-

торов $\vec{N}^{(j)}$, а значит и решения дисперсионного уравнения. Результаты проверки приведены в шестом столбце таблицы. Как видно из таблицы, волны, распространяющиеся в кристалле в данном направлении, не являются чисто поперечными или чисто продольными. Их можно характеризовать как квази-поперечные или квази-продольные. Преимущественным направлением поляризации считается то направление, значение направляющего косинуса для которого максимально. Так, первая волна квази-поперечная и поляризована вдоль оси z , вторая – квази-продольная и поляризована вдоль оси y , третья – квази-поперечная и поляризована вдоль оси x .

Библиографический список

1. Гуляев, Ю.В. Резонаторы и фильтры сверхвысоких частот на объемных акустических волнах: современное состояние, тенденции развития / Ю.В. Гуляев, Г.Д. Мансфельд // Радиотехника, 2003. № 8. С. 42–54.
2. Каринский, С.С. Полупроводниковые преобразователи и их применение / С.С. Каринский. – М.: Наука, 1973.
3. Сиротин, Ю.И. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. – М.: Наука, 1979. – 639 с.
4. Балакирев, М.К. Волны в пьезокристаллах / М.К. Балакирев, И.А. Гишинский. – Новосибирск: Наука, 1982. – 239 с.
5. Акустические кристаллы: справочник / А.А. Блистанов [и др.]; под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.12.2013*

A.V. Danilov, A.A. Radionov

CALCULATION OF BULK ACOUSTIC WAVES PROPAGATING IN THE CRYSTAL LiNbO₃

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: In this work was researched dispersion characteristics of bulk waves in monocrystal LiNbO₃.

Design\methodology\approach: Derivation of the dispersion equation for bulk waves produced using equations piezoacoustics.

Finding: To find the velocity of bulk waves in piezocrystal determined eigenvalue Kristofell acoustic tensor.

Reseach limitations\implications: Was proved, that three waves are able to propagate in the direction of axis of symmetry: one longitudinal and two transverse. At random direction propagate quasi-longitudinal and quasi-transverse waves.

Originality\value: Conclusions able to be used during create acoustoelectronic devices, such as filters, resonators, delay lines.

Key words: bulk acoustic wave, cristal LiNbO₃, equation dispersion.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

А.А. Васильев¹, С.Ю. Костин¹, С.А. Сергиевский², Е.В. Степанов¹, А.В. Тумасов¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОПОЕЗДА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ADAMS/CAR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Эм-Эс-Си Софтвэр РУС»²

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований свойств управляемости и устойчивости автопоезда в составе тягача категории N3 и полуприцепа категории O4 массой 40,5 т. Компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе Adams/Car лицензионного пакета University MD FEA Bundle + Motion Bundle, переданного в НГТУ компанией MSC.Software GmbH в рамках соглашения о стратегическом сотрудничестве.

Ключевые слова: автопоезд, моделирование, управляемость, устойчивость, отрыв колеса.

Повышение активной безопасности транспортных средств является актуальной и значимой проблемой в автомобилестроении, при этом особое внимание традиционно уделяется повышению свойств управляемости и устойчивости [1]. Все большее значение при выполнении работ, направленных на повышение активной безопасности автотранспортных средств, приобретает имитационное моделирование [2, 3]. Моделирование представляет процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [4].

В данной работе представлены результаты моделирования условий криволинейного движения автопоезда, имитирующих различные виды сертификационных испытаний, предусмотренных ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания» [5].

В качестве программного комплекса для проведения исследований был выбран программный комплекс Adams/Car лицензионного пакета University MD FEA Bundle + Motion Bundle, обладающий значительным функционалом и имеющий широкий спектр возможностей:

- моделирование транспортного средства с учетом ключевых конструктивных параметров, оказывающих влияние на динамику движения;
- моделирование автомобильных шин с использованием специального модуля Adams/tire, обеспечивающего учет жесткостных и демпфирующих свойств покрышки;
- возможность задания типовых управляющих воздействий на органы управления;
- обеспечение высококачественной текстурированной трехмерной визуализации;
- вывод графиков измеряемых величин (в частности, скорости, нормальных реакций на колесах, углов увода и пр.).

Объектом исследования являлся автопоезд в составе тягача категории N3 и полуприцепа категории O4 массой 40,5 т. В качестве аналога был выбран полуприцеп, разработанный специалистами голландской фирмы Welgro [6], имеющий три оси, последняя из которых является управляемой, т.е. обеспечивающей поворот колес оси при повороте на

определенный угол, в зависимости от кривизны траектории (рис. 1). В качестве тягача автопоезда выбран автомобиль DAF, информация о конструктивных особенностях которого получена с официального сайта компании DAF [7]. Остальные параметры автопоезда приняты по результатам аналитических расчетов, проведенных специалистами НГТУ.

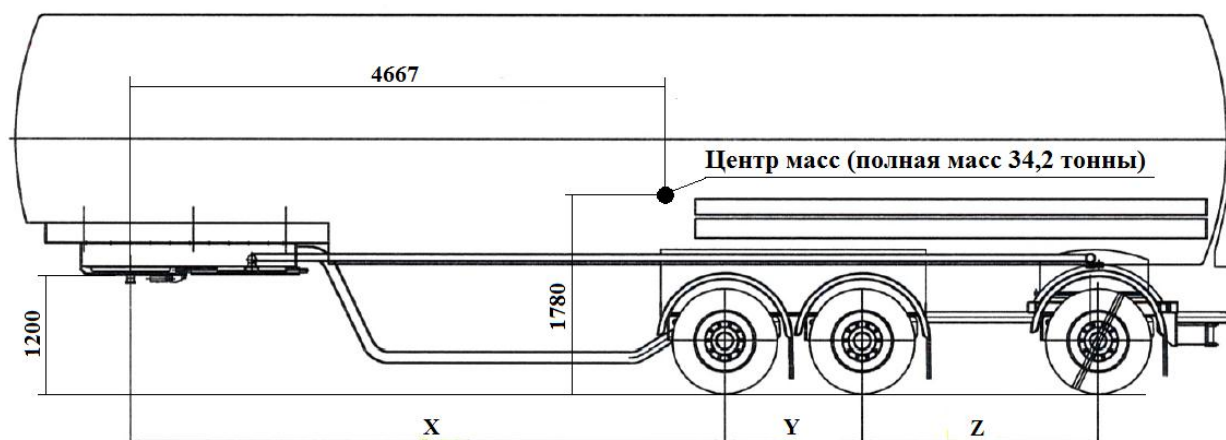


Рис. 1. Схема полуприцепа Welgro с задней управляемой осью

Моделирование движения транспортного средства в программном комплексе Adams/Car можно разделить на два основных этапа:

1. Создание виртуального полигона:

- моделирование дорожного полотна;
- «разметка» участков виртуального испытания в соответствии с требованиями нормативных документов;

2. Создание модели автопоезда:

- создание подсистем и агрегатов транспортного средства;
- сборка модели транспортного средства из подсистем;
- задание управляющего воздействия (формирование алгоритма управления транспортным средством);

3. Моделирование криволинейного движения.

4. Анализ и обработка результатов моделирования.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 52302-2004 наиболее значимыми являются результаты статических испытаний на стенде опрокидывателя (определение предельного угла поперечного наклона автопоезда, при котором начинается его опрокидывание), а также динамические испытания (определение критической скорости совершения маневров: вход в поворот и смена полосы движения).

На рис. 2 показана схема созданного виртуального полигона, представляющего собой набор определенных участков, необходимых для имитации условий сертификационных испытаний (смена полосы движения) в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004.

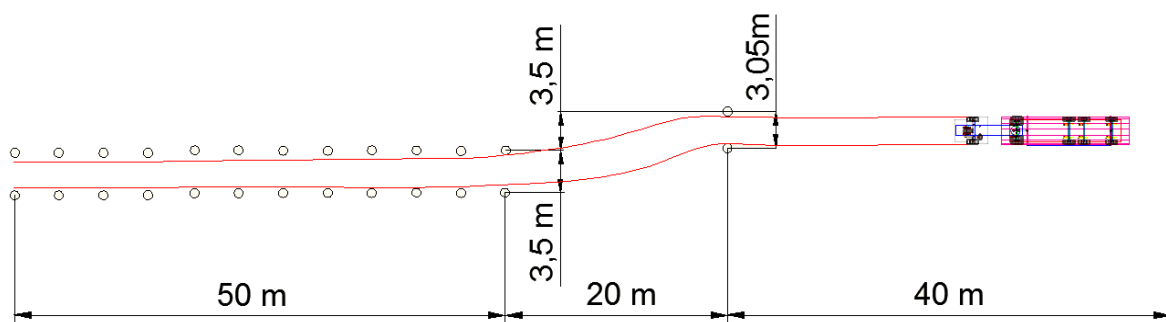


Рис. 2. Схема виртуального полигона для имитации испытания «смена полосы движения»

На рис. 3 показана модель автопоезда, учитывающая основные конструктивные параметры: развесовку, расположение высот центров тяжести тягача и полуприцепа, кинематику и упругодемпфирующие свойства подвесок и пр.

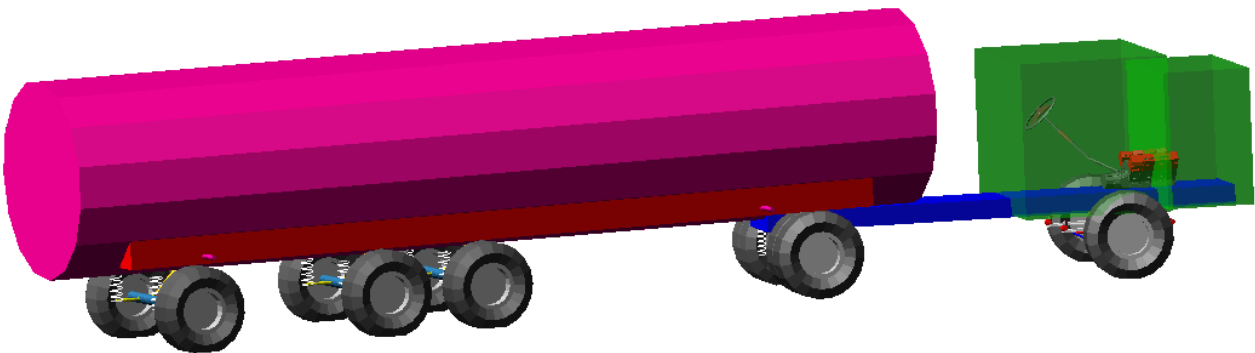


Рис. 3. Схема модели автопоезда (тягач DAF, полуприцеп Welgro)

На первом этапе моделирования с целью проверки работоспособности и предварительной оценки адекватности поведения имитационной модели были выполнены тестовые испытания «статическое опрокидывание на стенде». По результатам данного испытания можно судить о положении центра тяжести полуприцепа относительно поверхности дороги, а также оценить основной показатель поперечной статической устойчивости – угол, при котором происходит отрыв всех колес одной стороны одного из звеньев седельного автопоезда от опорной поверхности.

На рис. 4 показаны результаты компьютерного моделирования, при котором модель автопоезда, установленная на поворотную плиту, наклонялась в сторону до момента полного отрыва колес от опорной поверхности.

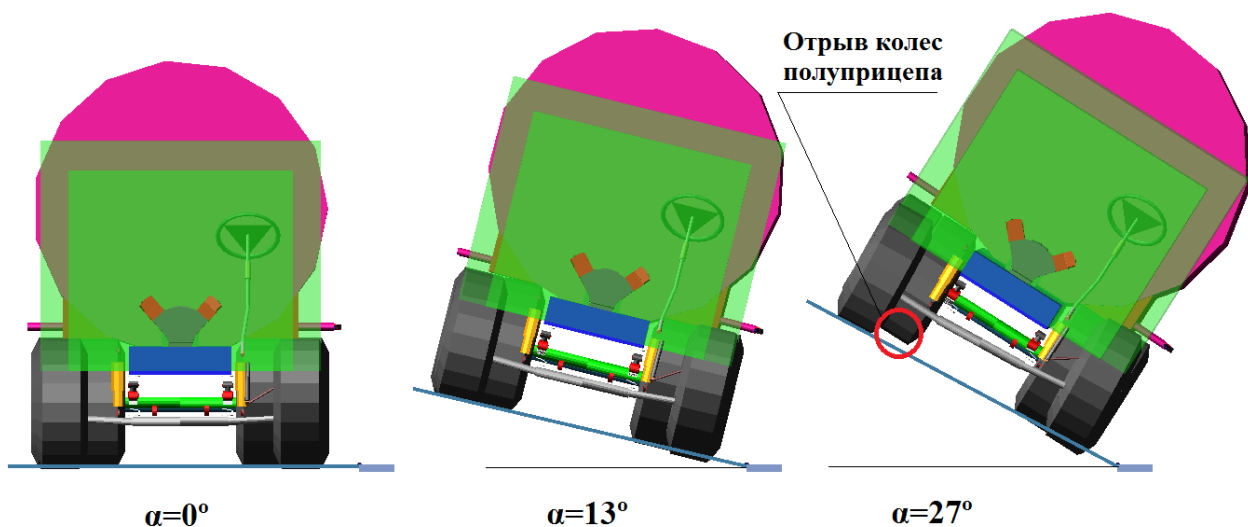


Рис. 4. Имитация испытания «опрокидывание на стенде»

На рис. 5 показаны графики изменения нормальных реакций на колесах правого борта полуприцепа. Из рисунка видно, что первым отрывается колесо 2 (колесо средней оси полуприцепа) в момент времени $t = 39$ с, соответствующий углу поворота платформы равному $26,5^\circ$ (рис. 6).

На рис. 7 показан фрагмент натуральных испытаний, выполненных в Голландии специалистами Испытательной лаборатории НГТУ (Г.А. Кониковой и А.Л. Безруковым) при поддержке компании Welgro. Сравнительный анализ результатов испытаний с данными имита-

ционного моделирования представлен в табл. 1. Видно, что расхождение значений угла наклона, при котором наблюдается отрыв колеса полуприцепа, составляет 5,6%, что является вполне приемлемым и свидетельствует об адекватном поведении модели и корректном выборе положений центров масс тягача и полуприцепа.

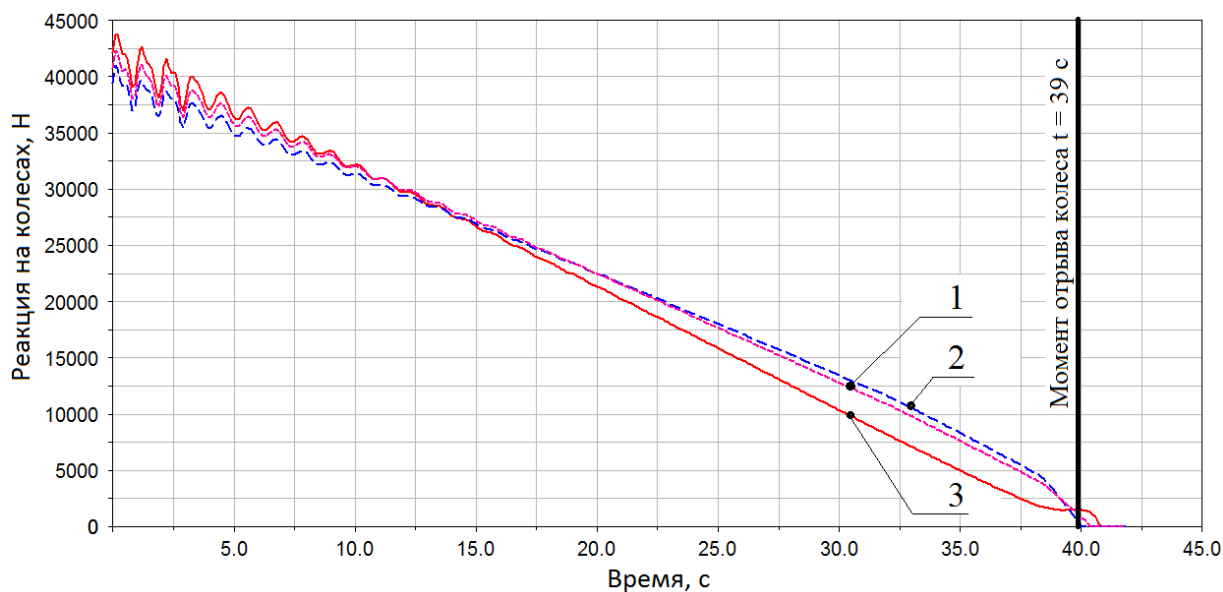


Рис. 5. Графики изменения нормальных реакций на колесах правого борта полуприцепа: 1 – колесо первой оси; 2 – колесо средней оси; 3 – колесо управляемой оси

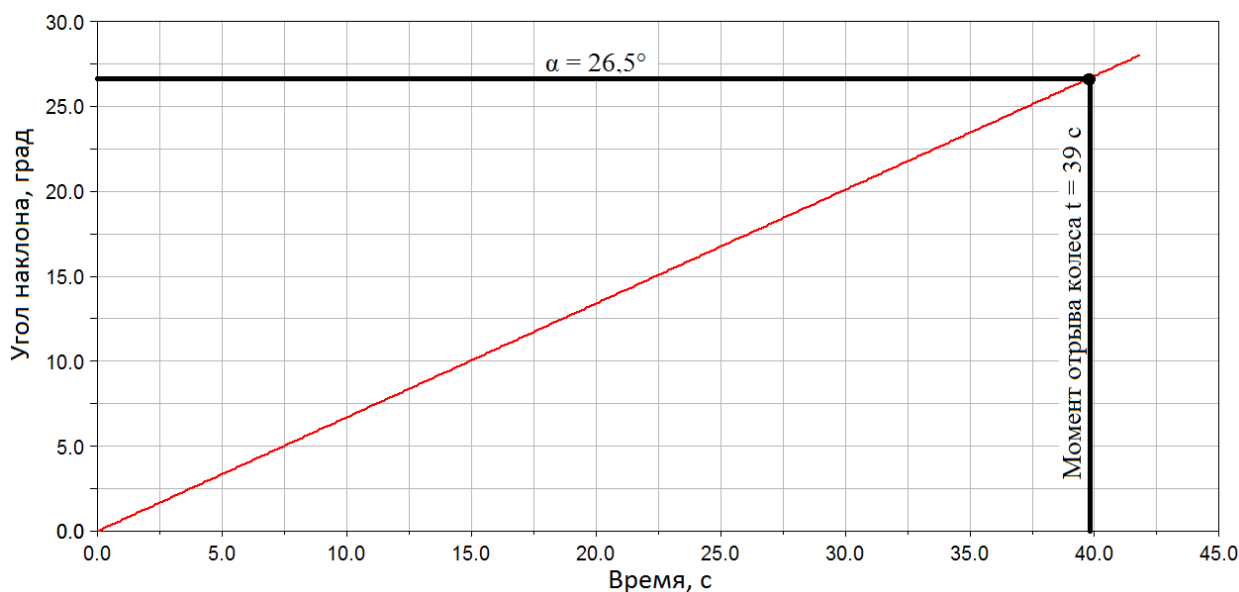


Рис. 6. График зависимости угла поворота платформы от времени

Таблица 1

Сравнение результатов компьютерного моделирования с данными экспериментальных исследований

	Угол статической устойчивости, град
Экспериментальные исследования (рис. 7)	25,1
Моделирование (рис. 4 - 6)	26,5
Расхождение, %	5,6



Рис. 7. Фрагмент натуральных испытаний по оценке статической поперечной устойчивости

С использованием разработанного виртуального полигона (рис. 2) и модели автопоезда (рис. 3) было выполнено виртуальное испытание, имитирующее условия сертификационных испытаний «смена полосы движения (переставка)». На рис. 8 показан фрагмент компьютерного моделирования.

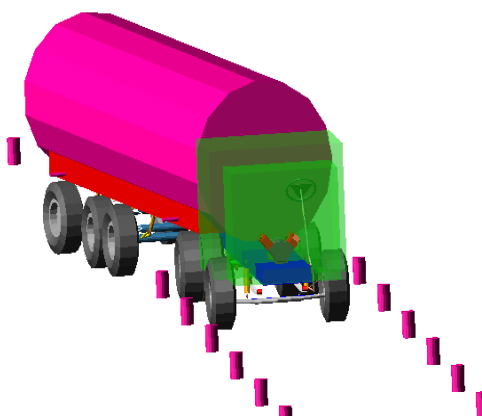


Рис. 8. Фрагмент виртуальных испытаний «смена полосы движения (переставка)»

Для точной оценки момента возникновения отрыва хотя бы одного из колес в ходе виртуальных испытаний были проанализированы графики изменения нормальных реакций на колесах автопоезда (рис. 9). На графике показаны данные по вертикальным реакциям, соответствующие криволинейному движению на скорости 52 км/ч. Данная скорость регламентирована требованиями ГОСТ Р 52302-2004 для исследуемого автопоезда в составе тягача категории N3 и полуприцепа категории O4. Результаты, представленные на рис. 9, позволяют констатировать факт отсутствия отрыва колес во время испытаний, поскольку не одна из величин не имеет нулевого (либо отрицательного) значения.

Результаты моделирования показали, что критической скоростью совершения маневра «переставка» является 52,6 км/ч. При этой скорости наблюдается отрыв одного из колес (колеса средней оси) полуприцепа от полотна пути, что по требованиям ГОСТ является недопустимым.

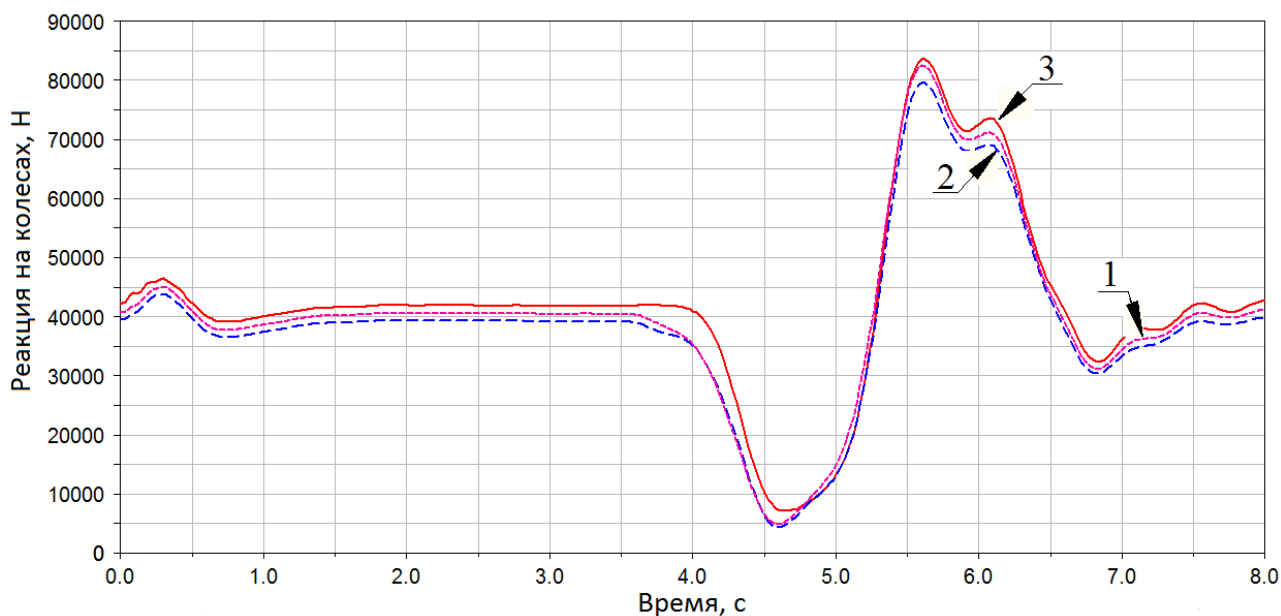


Рис. 9. Графики изменения нормальных реакций на колесах правого борта полуприцепа при выполнении маневра «переставка»:

1 – колесо первой оси; 2 – колесо средней оси; 3 – колесо управляемой оси

На рис. 10 показан фрагмент натурных испытаний, при которых критическая скорость совершения маневра составила 54 км/ч. Сравнительный анализ результатов дорожных испытаний с данными моделирования показал, что расхождение значений предельной скорости совершения маневра не превышает 3%. Относительно малое расхождение свидетельствует об адекватном поведении модели и приемлемой точности моделирования.



Рис. 10. Фрагмент дорожных испытаний «смена полосы движения (переставка)»

Удовлетворительная сходимость результатов расчетов с данными натурных испытаний свидетельствует о правильности выбранных подходов моделирования. Это позволяет использовать разработанную модель для оценки влияния отдельных параметров на свойства управляемости и устойчивости автопоезда. Например, интересным является оценка влияния расстояний X , Y и Z , указанных на рис. 1, на характер криволинейного движения автопоезда как при смене полосы движения, так и при входе в поворот. Очевидно, что по результатам

моделирования можно выделить область параметров, при которых автопоезд будет иметь наилучшие показатели управляемости и устойчивости. Одновременно с этим возможно выявление геометрических параметров, при которых движение автопоезда будет неустойчивым. В совокупности полученные результаты могут представлять большой практический интерес для инженеров, занимающихся проектированием полуприцепов.

Библиографический список

1. **Бахмутов, С.В.** Совершенствование метода интегральных силовых диаграмм для оценки управляемости и устойчивости автомобиля / С.В. Бахмутов, А.А. Ахмедов, А.Б. Орлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1 (11). С. 22–26.
2. **Дыгало, В.Г.** Применение виртуально-физической технологии моделирования для проектирования систем активной безопасности / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: сб. материалов 79-й Международной научно-технической конференции «Ассоциации автомобильных инженеров» /НП «ИНСАТ». Н.Новгород. 2012. С. 55–63.
3. **Грошев, А.М.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.М. Грошев, В.Г. Дыгало, А.В. Тумасов [и др.] // Журнал ААИ. 2011. №2. С. 34–37.
4. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
5. **ГОСТ Р 52302-2004** «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания». – М., 2004.
6. <http://www.welgro.nl> (дата обращения 01.10.2013)
7. <http://www.daf.com> (дата обращения 05.10.2013)

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

A.A. Vasiliev¹, S.Y. Kostin¹, S.A. Sergievskiy², E.V. Stepanov¹, A.V. Tumasov¹

SIMULATION OF CURVILINEAR MOTION OF ROAD TRAIN IN ADAMS/CAR SOFTWARE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Limited Liability Company “MSC Software RUS”²

Purpose: Estimating of road train behavior in lane changing conditions that are regulated by GOST R 52302-2004 on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of ADAMS/CARsoftware that allows taking into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of road train active safety characteristics on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of road train safety and estimation of effectiveness of active safety systems components.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of road train behavior that could have a good practical application.

Key words: road train, simulation, steer ability, stability, cornering breakaway.

УДК 629.113

И.Е. Анучин, Д.А. Бутин, В.В. Беляков, К.О. Гончаров

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОНОЧНОГО БОЛИДА ФОРМУЛА-СТУДЕНТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований тягово-скоростных свойств гоночного болида Формула-Студент, спроектированного и созданного командой НГТУ «AMIGO». Представлены результаты моделирования, полученные в программе SDK-Simulation, а также результаты дорожных испытаний, проведенных на гоночной трассе «Нижегородское кольцо», а также полученных в ходе международного этапа соревнований, проходивших в Италии с 12 по 17 сентября на гоночном треке Рикардо Палетти под Пармой.

Ключевые слова: гоночный болид, тяговые свойства, время разгона, максимальная скорость.

Исследование динамических свойств гоночного болида является важным этапом его проектирования и доводки. С целью минимизации временных и материальных затрат на поиск рациональных конструктивных параметров автомобиля, реальные испытания нередко заменяют виртуальными, имитируя при этом условия движения болида в каких-либо дорожных условиях [1-3].

Основным отличием условий движения гоночного болида от условий эксплуатации типового легкового автомобиля является характер контактного взаимодействия колес с опорной поверхностью. При движении спортивного автомобиля и совершении большинства маневров, колеса болида находятся в состоянии, близком к потере сцепления с дорогой, что не является характерным для типового автомобиля. В этой связи при проведении виртуальных испытаний гоночного болида важным является наиболее достоверная имитация процессов, наблюдаемых во время реальных испытаний, в том числе моделирование сил и моментов, возникающих в пятне контакта колеса с дорогой.

Объектом исследования настоящей работы является гоночный болид класса «Формула-Студент», спроектированный студенческим конструкторским бюро АМИ НГТУ «AMIGO». Целью работы являлось расчетно-экспериментальное исследование динамики движения болида в различных условиях эксплуатации, в том числе близких к критическим.

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс SDK-Simulation. Пакет не позволяет воссоздать визуальное соответствие модели и реального гоночного болида (внешняя форма модели соответствует типовому легковому автомобилю, рис. 1, а), однако программа позволяет моделировать виртуальный полигон с различными участками трассы (рис. 1, б), а также в полной мере учитывать ключевые конструктивные параметры автомобиля.

Очевидно, что наибольшее влияние на результаты моделирования оказывают такие параметры модели, как: масса, моменты инерции узлов и агрегатов относительно главных осей, расположение центра масс, характеристики подвесок, а также характеристики покрышек. Определение достоверных и достаточно точных данных по массам и моментам инерции на стадии проектирования стало возможным благодаря применению современных программ трехмерного твердотельного и поверхностного моделирования. Расчет центра тяжести болида, а также моментов инерции основных элементов конструкции производился в программе Autodesk Inventor 2013. Для примера, на рис. 2, а показана геометрическая модель колеса, а на рис. 2, б изображено диалоговое окно программы, в котором задаются геометрические и

физические свойства. В табл. 1 представлены основные параметры автомобиля, использованные при создании виртуальной модели.

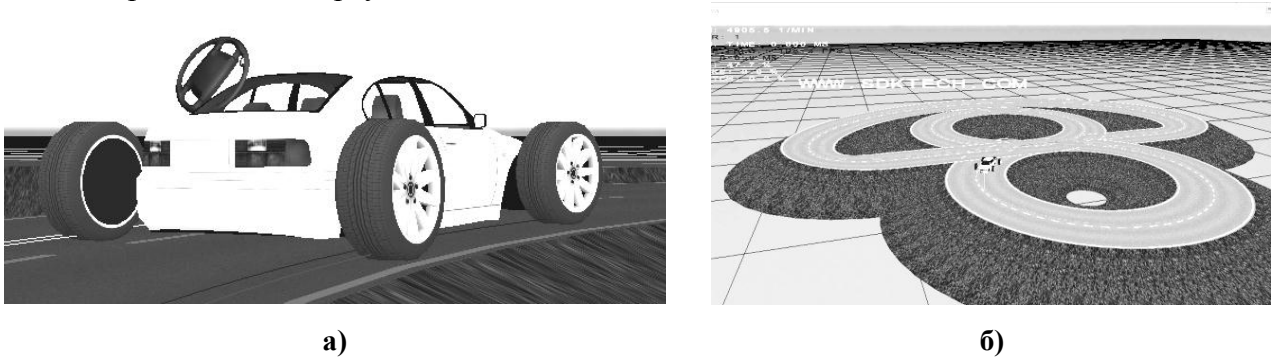


Рис. 1. Моделирование движения гоночного болида в программе SDK-Simulation:
a – модель гоночного болида; *б* – модель виртуального гоночного трека

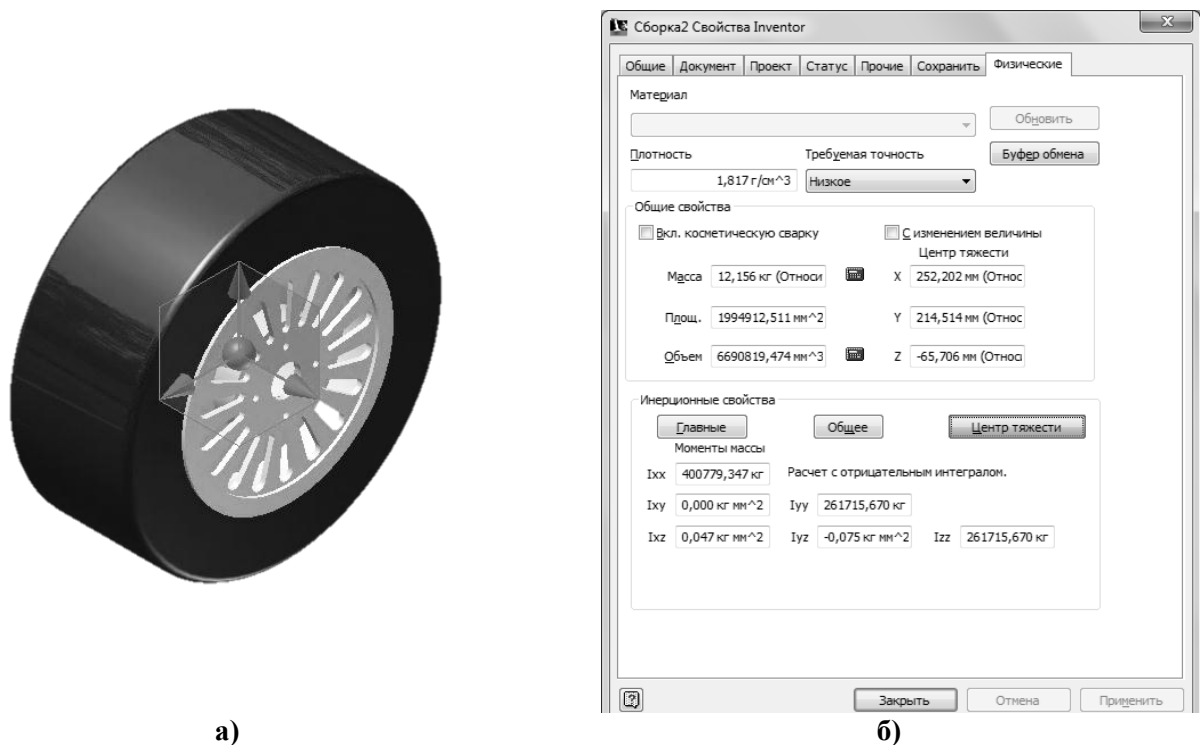


Рис. 2. Расчет геометрических характеристик в программе Autodesk Inventor 2013:
a – модель колеса; *б* – диалоговое окно программы

На первом этапе исследования, оценка тягово-скоростных свойств и свойств активной безопасности автомобиля проводилась по результатам моделирования в условиях движения модели по трассе Skid-Pad «восьмерка». Основная задача таких испытаний заключается в определении максимального (предельного) бокового ускорения, с которым автомобиль может двигаться в повороте, сохраняя при этом устойчивое криволинейное движение. На рис. 3 показаны графики изменения скорости движения и бокового ускорения при моделировании криволинейного движения болида.

По результатам моделирования было установлено, что время прохождения трассы Skid-Pad «восьмерка» составляет 7,05 с. При сравнении данного результата с аналогичными данными, известными для болидов других международных команд [4], было установлено, что принятые параметры болида могут обеспечить достаточные тягово-скоростные свойства, необходимые для конкурирования с лучшими командами Европы, США и других стран.

Таблица 1

Параметры гоночного автомобиля

№	Параметр	Значение	Размерность
	Масса	300	кг
2	Центр тяжести	-1,65;0;0,325	м
3	Момент инерции X	40,97	кг·м ²
4	Момент инерции Y	61,98	кг·м ²
5	Момент инерции Z	181,95	кг·м ²
6	Площадь проекции X;Y;Z	0,8;1,5;1,5	м ²
7	Центр площади	-1,5;0;0,45	м
8	Мощность двигателя	100	Нм
9	Максимальные обороты	6000	об/мин
10	Максимальный момент, передаваемый сцеплением	100	Нм
11	Передаточные числа КПП	5,56; 3,8; 3,04; 2,6; 2,2; 2,1	
12	Передаточное отношение главной передачи	3	
Передняя ось			
13	Центр переднего моста	-0,7;0;0,216	м
14	Расстояние между колесами	1,504	м
15	Расстояние между осями поворота	1,344	м
16	Расстояние между пружинами	1,344	м
17	Расстояние между амортизаторами	1,344	м
18	Жесткость стабилизатора	0	Н/м
19	Передаточное число пружин	0,7	
20	Поперечный наклон шкворня	-1	градус
21	Схождение колес	0,2	градус
22	Поперечный наклон шкворня	0	градус
23	Продольный наклон шкворня	5	градус
24	Не подрессоренная масса	13,1	кг
Задняя ось			
25.	Центр заднего моста	-2,58;0;0,216	м
26.	Расстояние между колесами	1,504	м
27.	Расстояние между осями поворота	1,344	м
28.	Расстояние между пружинами	1,344	м
29.	Расстояние между амортизаторами	1,344	м
30.	Жесткость стабилизатора	0	Н/м
31.	Передаточное число пружин	0,7	
32.	Поперечный наклон шкворня	-1	градус
33.	Схождение колес	0,2	градус
34.	Поперечный наклон шкворня	0	градус
35.	Продольный наклон шкворня	5	градус
36.	Не подрессоренная масса	13,1	кг
37.	Диаметр колеса	0,532	м
38.	Момент инерции колеса	0,39	кг·м ²
39.	Жесткость шин	250000	Н/м
40.	Профиль шины	0,4	Ш/Д
41.	Жесткость пружин	60000	Н/м
42.	Предварительная сила	0	Н
43.	Жесткость амортизаторов при сжатии	2377	Н·с/м
44.	Жесткость амортизаторов при отбое	1829	Н·с/м
45.	Передаточное число рулевого управления	0,116	град./град.

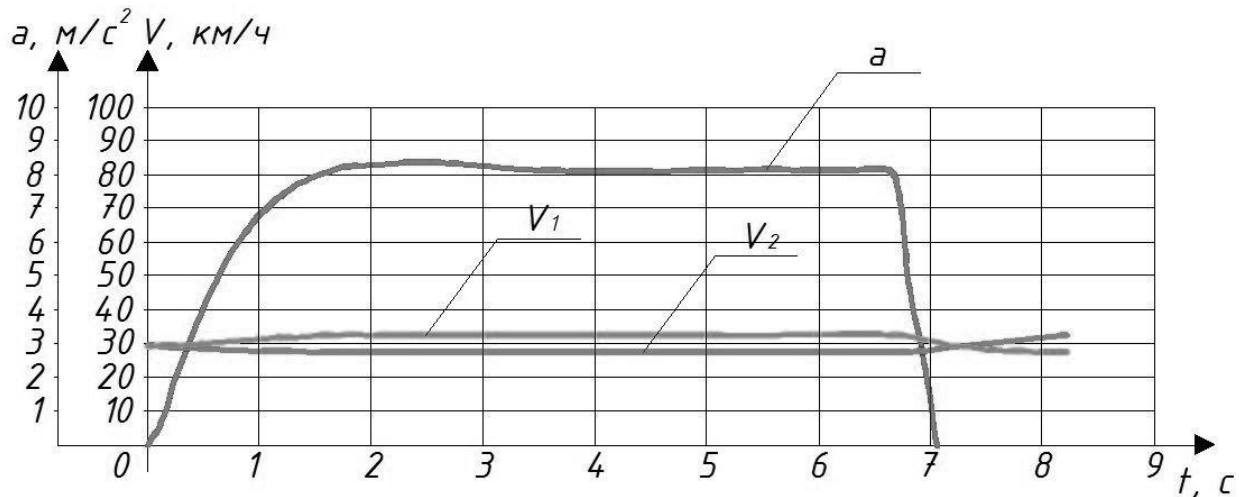
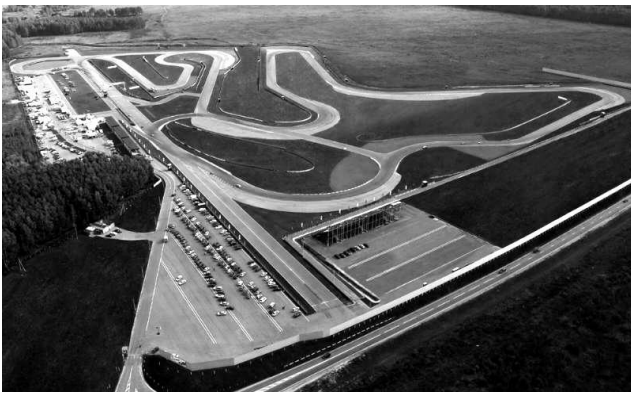
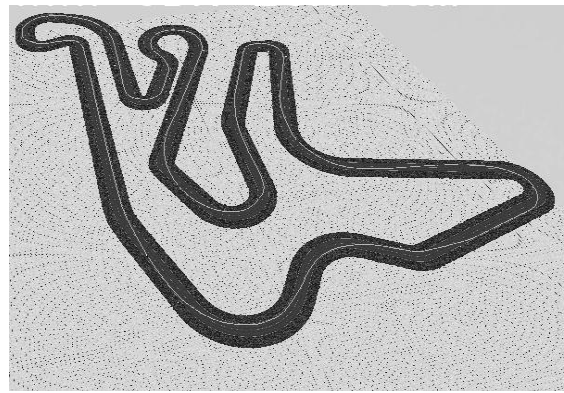


Рис. 3. График скорости колес и бокового ускорения (результаты моделирования):
 a – боковое ускорения автомобиля, м/с^2 ; V_1 – скорость внешних колес в повороте, км/ч ;
 V_2 – скорость внутренних колес в повороте, км/ч

На втором этапе исследования тягово-скоростных свойств гоночного болида имитировалось его движение по трассе автополигона «Нижегородское кольцо» (рис. 4). Длина трассы составляет 3222 м, а ширина полотна пути 12...16 м. Основная задача этого виртуального испытания заключалась в определении минимального времени прохождения круга и определение наибольших значений боковых ускорения, возникающих при прохождении трассы. Движение модели автомобиля осуществлялось по так называемой «идеальной» траектории, рекомендуемой для скоростного движения.



а)



б)

Рис. 4. Гоночная трасса «Нижегородское кольцо»:
 a – фотография трассы; b – виртуальная модель трассы

В программном комплексе SDK-Simulation существует возможность имитации поведения водителя (пилота), реализуемая с помощью различных алгоритмов управления автомобилем и задаваемых параметров, характеризующих физиологические свойства человека (время реакции, скорость манипулирования органами управления и др.). Изменяя алгоритм действий пилота (момент переключения передач, интенсивность разгона и торможения), можно добиться оптимальной скорости прохождения определенного участка трассы. По результатам виртуальных испытаний были получены следующие значения:

- максимальное продольное ускорение $a_{\max} = 10 \text{ м/с}^2$ (при торможении);
- максимальное боковое ускорение $a_{\max} = 10 \text{ м/с}^2$;
- максимальная скорость движения $V_{\max} = 130 \text{ км/ч}$;
- время прохождения круга $t = 160 \text{ с}$.

Проверка адекватности разработанной модели и оценка целесообразности принятых конструктивных параметров проводилась по результатам дорожных испытаний.

Первые положительные результаты были получены на чемпионате мира Formula SAE, проходившем в Италии с 12 по 17 сентября 2013г. на гоночном треке Рикардо Палетти под Пармой, где 55 команд из 40 стран мира представляли свои гоночные автомобили в классе Formula Student и Formula Electro, созданные в соответствии с регламентом спортивно-технических состязаний [5]. Нижегородской команде, единственной из семи российских команд-участниц чемпионата, удалось дойти до финала и успешно финишировать в гонке на 22 километра со сменой пилота (рис. 5). По результатам суммирования всех баллов за все теоретические и практические этапы нижегородская команда заняла 35 место из 55. Автомобиль нижегородских политехников занял десятое место в тесте на экономичность.



Рис. 5. Команда «АМІго» на соревнованиях в Италии

Более детальное исследование тягово-скоростных свойств гоночного болида было проведено на трассе полигона «Нижегородское кольцо» (рис. 6). Разгонная динамика проверялась на прямом участке спортивного комплекса, а криволинейное движение проводилось на специальной широкой площадке, расположенной около основной трассы. Динамические характеристики автомобиля (ускорение, скорость, пройденный путь) замерялись бесконтактной измерительной системой Racelogic.



Рис. 6. Испытания гоночного болида на трассе «Нижегородское кольцо»

На рис. 7 показан график разгона гоночного болида, полученный в ходе испытаний (кривая 1); кривая 2 показывает аналогичный график разгона, полученный по результатам моделирования. Видно, что результаты имеют хорошую сходимость, расхождение результатов не превышает 1-3%.

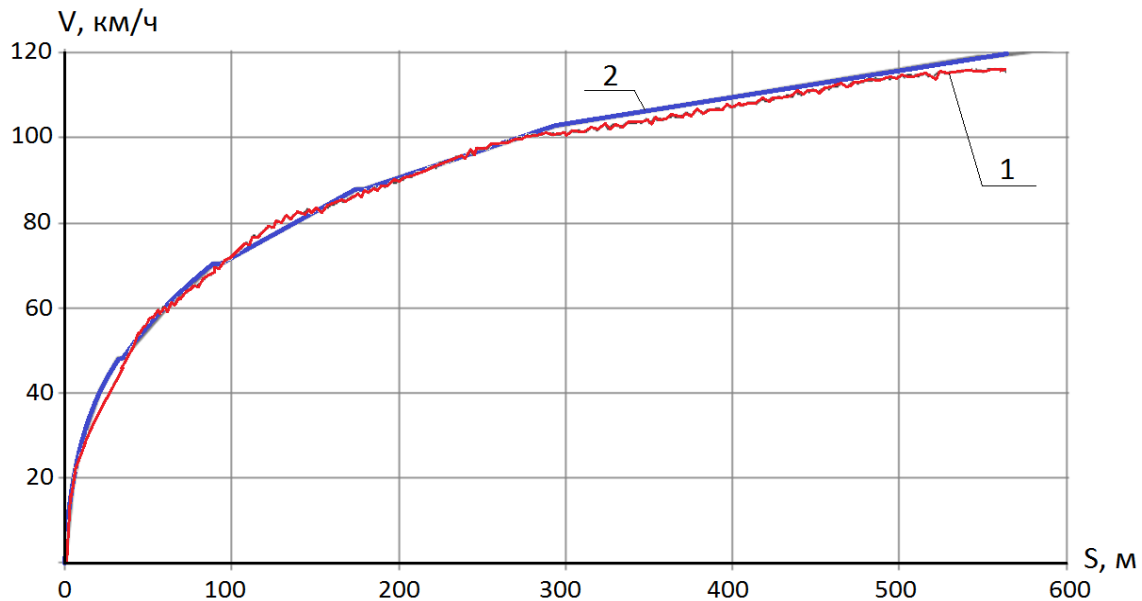


Рис. 7. График разгона гоночного болида:

1 – результаты дорожных испытаний; 2 – результаты моделирования

На рис. 8 показан график скорости движения автомобиля по круговой траектории, аналогичной той, которая моделировалась на первом этапе исследования (рис. 1, б). Сравнение графиков рис. 8 и рис. 3 показывает, что в обоих случаях предельная скорость криволинейного движения гоночного болида составила около 30 км/ч. Полученные результаты свидетельствуют о достоверности разработанной имитационной модели, а также справедливости подходов моделирования, принятых на этапе проектирования болида.

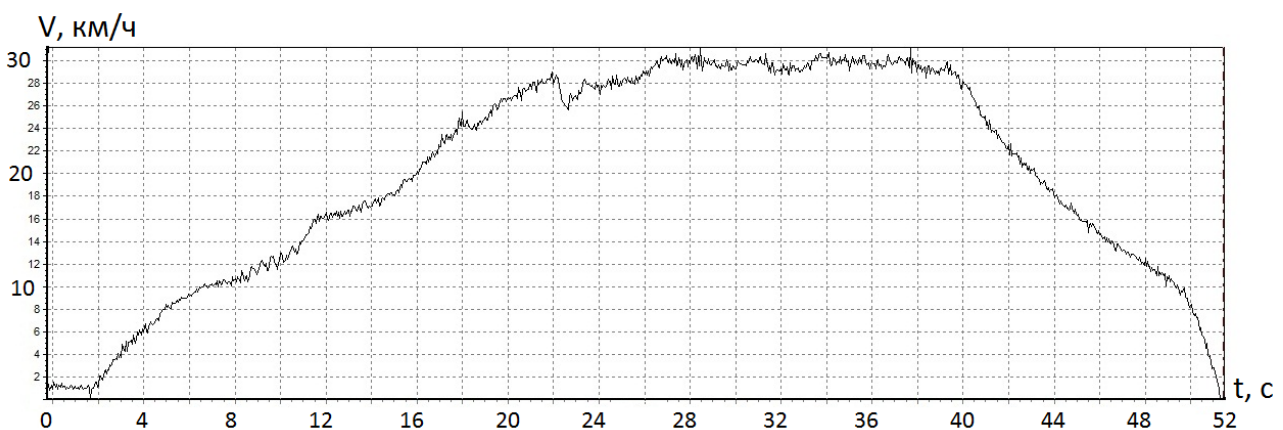


Рис. 8. График изменения скорости гоночного болида при движении по круговой траектории

Приведенные результаты расчетно-экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что использование программного обеспечения SDK-Simulation на начальных этапах проектирования позволяет достоверным образом спрогнозировать тягово-скоростные свойства гоночного болида, а также выбрать наиболее рациональные конструктивные параметры. Рассмотрение нескольких вариантов модели позволяет оценить степень

влияния отдельных параметров на ключевые свойства болида и выявить предпочтительные решения, которые впоследствии могут обеспечить требуемые показатели тягово-скоростных свойств. Хорошая сходимость результатов моделирования с данными экспериментальных исследований указывает на правомерность такого подхода, однако следует отметить, что точность моделирования во многом зависит от способа выбора и обоснования числовых значений, закладываемых в модель. В этой связи целесообразным является продолжение исследований по указанной тематике, направленных на более точное определение параметров шин, геометрических и физических характеристик элементов подвески и рулевого управления, наибольшим образом влияющих на свойства управляемости и устойчивости. Не менее важным является определение внешней скоростной характеристики двигателя на разных нагрузочных режимах, для более точного определения тяговых показателей автомобиля. Решение данных вопросов будет являться целью дальнейших расчетно-экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. **Criens, C.H.A.** Building a MATLAB based Formula Student simulator / C.H.A. Criens, T. ten Dam, H.J.C. Luijten, T. Rutjes // Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Technology Group, Eindhoven, 2006, 77 p. (<http://alexandria.tue.nl/repository/books/626941.pdf>)
2. **Razenberg, J.A.** Formula Student vehicle analysis by means of simulation / J.A. Razenberg, Dr. Ir. I.J.M. Besselink // Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Technology Group, Eindhoven, 2006, 43p. (<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/6871.pdf>)
3. **Böhm, T.** SIMPACK Supports Formula Student racing Series // SIMPACK News, 2011 – P. 23-24. (http://www.simpack.com/fileadmin/simpack/doc/newsletter/2011/SN-2011-Dec_Uni_Stuttgart_Formula_Student_LR.pdf)
4. Formula Student Germany 2012 Result FSC Skid Pad [электронный ресурс] URL:http://www.formulastudent.de/uploads/media/2012_FSC_SKID_PAD.pdf (дата обращения 20.11.2013)
5. Нижегородские политехники покорили Италию [электронный ресурс] URL: <http://www.nntu.nnov.ru/node/1287> (дата обращения 25.11.2013)

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

I.E. Anuchin, D.A. Butin, V.V. Belyakov, K.O. Goncharov

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF SPEED AND TRACTIVE CHARACTERISTICS OF FORMULA STUDENT RACING CAR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Estimating of speed and tractive characteristics of Formula Student racing car on the basis of computer simulation results and experimental data.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of SDK. Software that allows taking into account key race car parameters, road conditions and driver (racer) behavior.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of speed and tractive characteristics of Formula Student racing car on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

Research limitations/implications: Present study provides a starting-point for further research in the field of racing car active safety.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of Formula Student racing car behavior that could have a good practical application.

Key words: racing car, tractive characteristics, acceleration time, maximum speed.

УДК 629.113

Г.А. Коникова¹, П.В. Серeda², Ю.П. Трусов¹, К.М. Шашкина¹**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕГКОГО
КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Группа ГАЗ, дивизион «Легкие коммерческие автомобили»²

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований свойств управляемости и устойчивости легкого коммерческого автомобиля. Компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе SDK.Simulation. Экспериментальные исследования выполнены на полигоне ООО «ОИЦ». Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218).

Ключевые слова: легкий коммерческий автомобиль, подвеска, моделирование, управляемость, устойчивость, дорожные испытания.

Повышению активной безопасности автотранспортных средств уделяется большое внимание как на стадии их проектирования, так и на стадии доводки, при этом о целесообразности тех или иных конструктивных решений судят не только по результатам дорожных испытаний, но также по результатам компьютерного моделирования [1, 2]. Виртуальные модели транспортных средств используются для оценки их эксплуатационных свойств, определения возможных способов совершенствования конструкции, а также для оценки влияния определенных конструктивных изменений на безопасность [3 - 5].

В настоящей работе исследовались свойства управляемости и устойчивости легкого коммерческого автомобиля ГАЗ-2752 «Соболь». Задачами исследования являлись создание пространственной модели автомобиля и виртуального полигона, необходимых для имитации условий сертификационных испытаний по ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания» [6]. Данный государственный стандарт содержит следующие технические требования, касающиеся дорожных испытаний:

- Максимальную скорость автомобиля при выполнении маневра (далее — скорость маневра V_m) определяют как среднее арифметическое значение скоростей трех заездов с наибольшей скоростью, при которой не было выхода за пределы разметки или отрыва одного из колес автомобиля от поверхности дороги.
- При выполнении маневров на автомобиле категории М1 не должен происходить отрыв всех колес одной из сторон от поверхности дороги.
- Значения V_m , полученные при испытаниях, не должны быть ниже нормативных значений V_m .
- При значении V_m для испытуемого автомобиля ниже нормативного значения V_m более 10% эксплуатация на дорогах общего пользования не допускается.

Испытание «поворот» проводят с целью определения показателей, характеризующих управляемость и устойчивость автомобиля в критических режимах движения, а также при движении по криволинейной траектории (криволинейному коридору) с определенными параметрами (радиусом), рис. 1.

Перед входом в поворот автомобиль вводят в режим равномерного прямолинейного движения. Передачу в коробке передач выбирают наивысшую, обеспечивающую устойчи-

вую работу двигателя. При пересечении передними колесами автомобиля границы между участками 1 и 2 размеченного коридора водитель должен быстро снять ногу с педали газа и начать поворачивать рулевое колесо вправо для выполнения маневра.

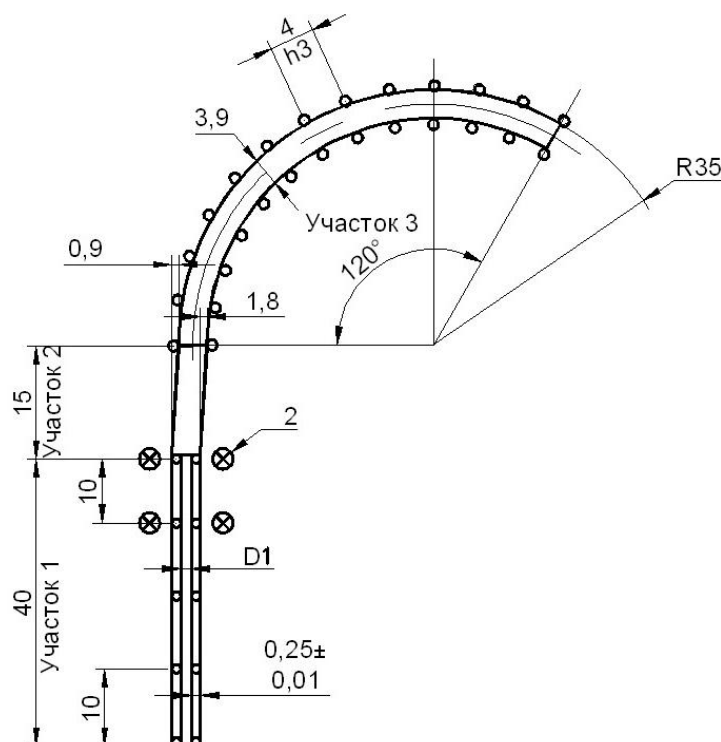


Рис. 1. Разметка участка испытаний «поворот $R_{\Pi} = 35$ м»:

- 1 - вертикальные ограничители разметки коридоров движения на участках 1, 2 и 3;
 2 - датчики измерения скорости; h_1 - шаг установки вертикальных ограничителей на участке 1;
 h_3 - шаг установки вертикальных ограничителей на участке 3;
 D_1 - ширина коридора на участке 1; D_3 - ширина коридора на участке 3

С целью расчетной оценки свойств управляемости и устойчивости легкого коммерческого автомобиля была разработана виртуальная модель транспортного средства с использованием средств программы SDK.Simulation. Параметры модели выбирались исходя из технической документации на автомобиль ГАЗ-2752 «Соболь».

Предварительно, для оценки адекватности разработанной модели проводилось исследование свойств статической устойчивости. С этой целью, при поддержке специалистов Испытательной лаборатории НГТУ, были выполнены стендовые испытания на реальном автомобиле. Показателем поперечной статической устойчивости, характеризующим склонность автомобиля к опрокидыванию, является угол статической устойчивости $\alpha_{с.у}$, при котором происходит отрыв всех колес одной стороны автомобиля. Величина угла $\alpha_{с.у}$ статической устойчивости, полученная в результате испытаний, должна быть не менее нормативного значения α_n . На рис. 2 показан фрагмент испытаний. Предварительно было проведено взвешивание микроавтобуса. Было установлено, что полная масса автомобиля, предоставленного для испытаний, составляет 2885 кг. Распределение массы по колесам оказалось следующим: передние колеса: 680 кг и 695 кг; задние колеса: 730 кг и 780 кг.

По результатам испытаний на статическую устойчивость было установлено, что отрыв заднего колеса происходит при угле наклона платформы на $45^{\circ}41'$. Отрыв обоих колес (переднего и заднего) наблюдается при следующих углах: передняя часть $47^{\circ}30'$; задняя часть $46^{\circ}58'$. Угол наклона подрессоренной массы (при отрыве обоих колес) соста-

вил: впереди $51^{\circ}46'$; сзади $50^{\circ}57'$. Полученные значения масс и углов использовались для определения расположения центра масс автомобиля. Было установлено:

- что расстояние от центра масс до передней оси составляет 1,349 м;
- расстояние от центра масс до задней оси составляет 1,411 м;
- высота центра масс составляет 0,716 м.

Результаты стендовых испытаний использовались для корректировки параметров пространственной виртуальной модели исследуемого транспортного средства.



Рис. 2. Экспериментальные исследования статической устойчивости микроавтобуса

Для компьютерного моделирования испытания «вход в поворот» был разработан виртуальный полигон (рис. 3), полностью соответствующий размерам испытательного участка, показанного на рис. 1.

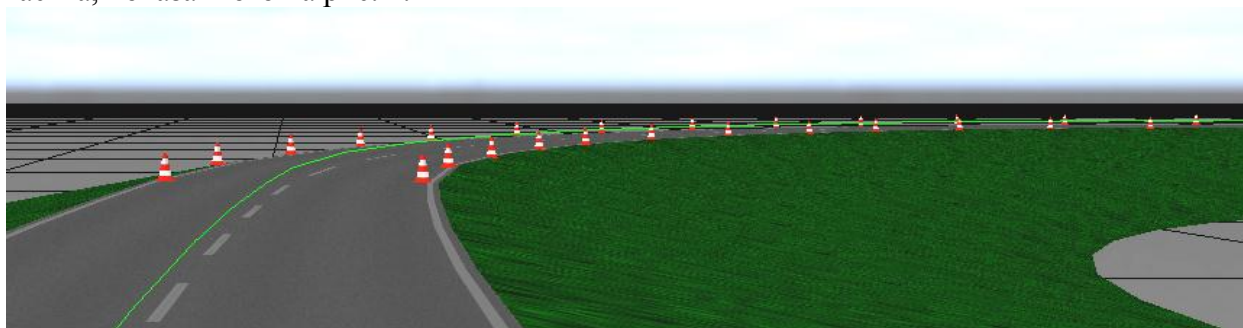


Рис. 3. Схема виртуального полигона (участок с криволинейной траекторией радиусом 35м)

Виртуальные испытания предполагают задание определенного управляющего воздействия, необходимого для заданного движения модели автомобиля. Для имитации испытания «вход в поворот» набор управляющих воздействий включает в себя следующие команды:

- 1) включить первую передачу;
- 2) установить педаль газа на 100 %;
- 3) если время равно 3 с, то включить вторую передачу в КПП;
- 4) если время равно 7 с, то включить третью передачу в КПП;
- 5) если время равно 15 с, то включить четвертую передачу в КПП;
- 6) если время равно 22 с, то включить пятую передачу в КПП;
- 7) если время равно 25 с, то удерживать постоянную скорость равную 58 км/ч;

8) если автомобиль пересекает дорожный объект номер 1 (виртуальный конус, установленный на входе в поворот), то установить педаль газа на 0% (т.е. прекратить подачу топлива);

9) если автомобиль пересекает дорожный объект номер 2 (виртуальный конус, установленный на выходе из поворота), то установить педаль тормоза на 100% (т.е. полностью остановить автомобиль).

В ходе виртуальных испытаний имеется возможность регистрации ключевых параметров движения модели: скорости, продольных и поперечных ускорений, вертикальных реакций на колесах и др. Для примера, на рис. 4 и 5 показаны графики изменения скорости и поперечных ускорений в ходе моделирования маневра. На рис. 6 показан фрагмент виртуальных испытаний с указанием условной нумерации колес модели.

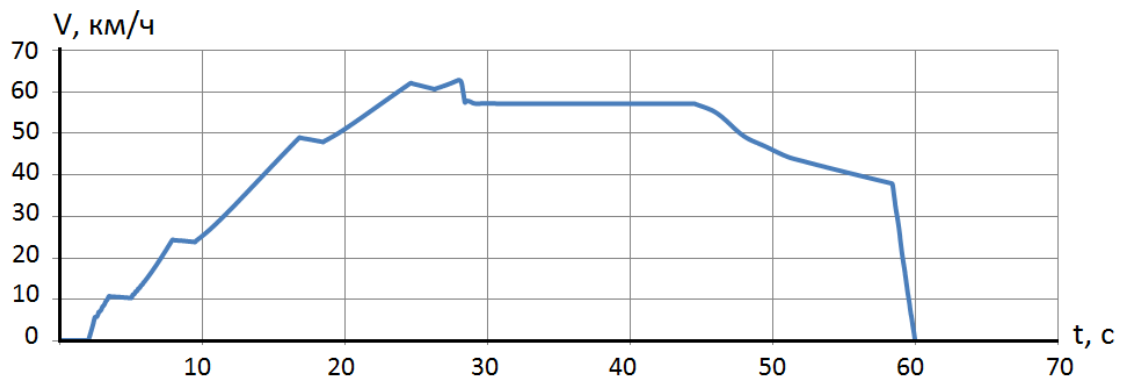


Рис. 4. График зависимости скорости автомобиля (V) от времени (t)

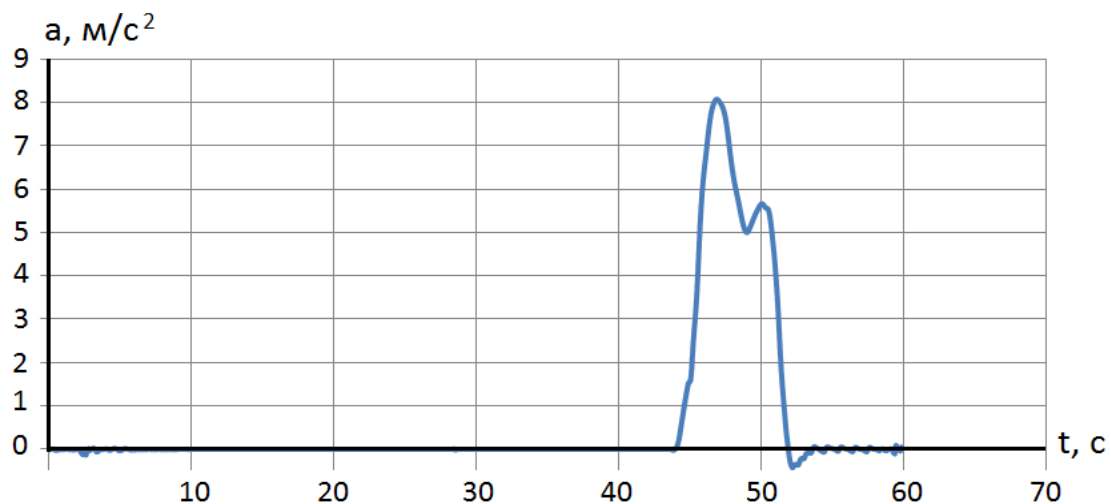


Рис. 5. График зависимости поперечного ускорения автомобиля (a) от времени (t)



Рис. 6. Фрагмент виртуальных испытаний «вход в поворот»

Так как по требованию нормативных документов при проведении испытаний на управляемость и устойчивость не должен происходить отрыв колес от дорожного полотна, то наиболее информативными с этой точки зрения являются графики изменения вертикальных реакций на колесах. Для примера на рис. 7 изображен график зависимости реакций на колесах автомобиля от времени при прохождении испытания поворот на скорости 58 км/ч. Как видно из графика рис. 7, при скорости 58 км/ч отрыва колеса не происходит, так как реакции на колесах не достигают нулевого значения.

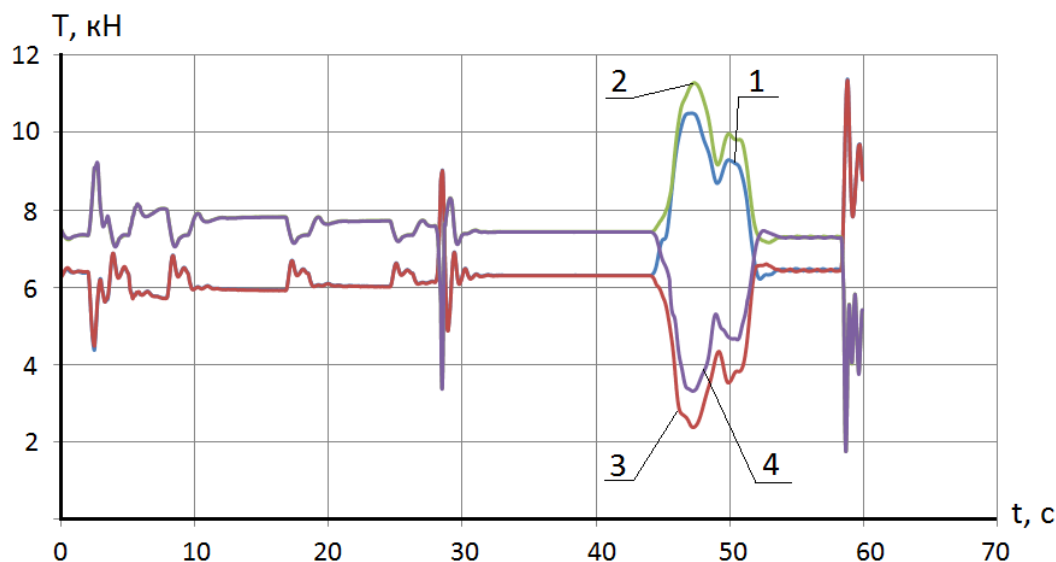


Рис. 7. Графики изменения вертикальных реакций (Т) на колесах от времени (t)
(Нумерация кривых соответствует нумерации колес модели автомобиля рис. 6)

Параллельно с виртуальными, на автополигоне ООО «ОИЦ» Группы ГАЗ проводились дорожные испытания легкого коммерческого автомобиля. Использовалась современная измерительная система RaceLogic VB20SL3 20Hz GPS Data Logger With Slip, Pitch and Roll Angle. Принцип работы системы основан на использовании GPS технологий: на крышу автомобиля устанавливаются магнитные антенны, которые обеспечивают связь со спутником и позволяют зафиксировать скорость транспортного средства, ускорение (по двум осям), траекторию движения, угол крена и угловую скорость поворота. На рис. 8 показан фрагмент испытаний «вход в поворот».



Рис. 8. Фрагмент испытания «вход в поворот»

По результатам обработки данных дорожных испытаний были получены графики, характеризующие процесс движения автомобиля в разных условиях. Для примера на рис. 9 показаны графики изменения скорости автомобиля для четырех однотипных испытаний.

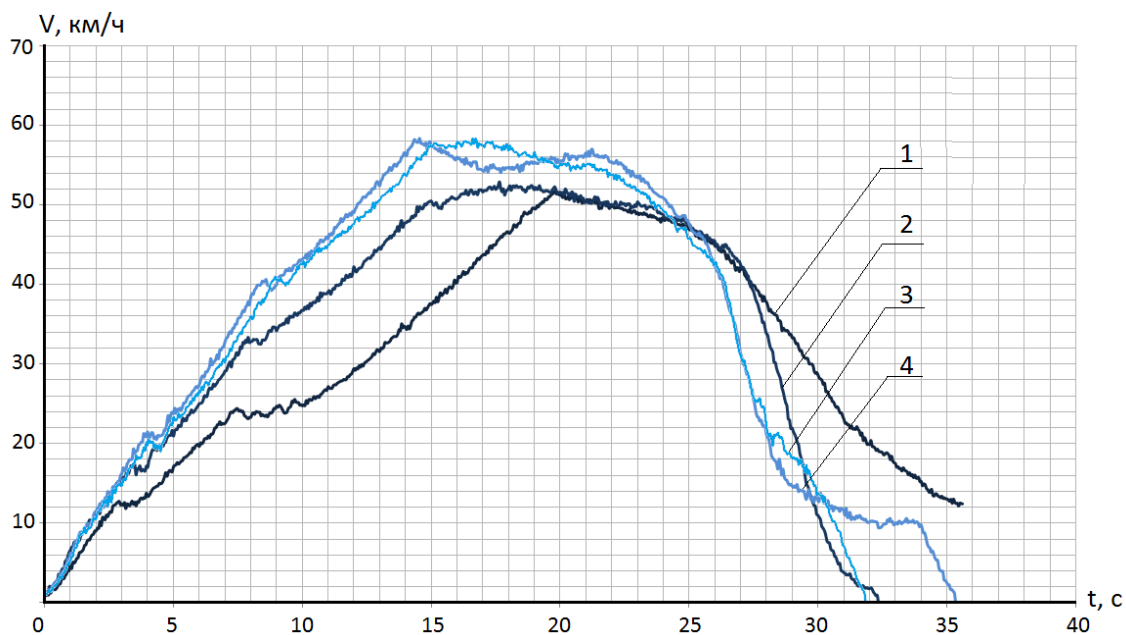


Рис. 9. Графики изменения скорости автомобиля при испытаниях «вход в поворот»

В табл. 1 представлен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и данных дорожных испытаний.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования с данными дорожных испытаний

Скорость маневра «вход в поворот», км/ч	Поперечное ускорение, м/с ²		Расхождение, %
	Испытания (среднее пиковое значение, по результатам четырех заездов)	Моделирование (пиковое значение)	
55	6,6	8,0	17,5

Анализ данных показывает, что результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования имеют хорошую сходимость. Как при испытаниях, так и при компьютерном моделировании наблюдался одинаковый характер поведения исследуемого объекта. В этой связи разработанную модель криволинейного движения автомобиля следует признать адекватной. Однако желательным является снижение уровня расхождения результатов (в частности, по боковым ускорениям).

Следует отметить, что виртуальная модель имеет лучшие показатели свойств управляемости и устойчивости, по сравнению с аналогичными показателями реального транспортного средства. В некоторой степени это объясняется тем, что некоторые параметры модели были «идеализированы», а некоторые были выбраны исходя из общепринятых рекомендаций и упрощенных расчетов, например:

- характеристики шин (закладывались обобщенные характеристики типовых шин легковых автомобилей),
- инерционные свойства поддрессоренной и неподдрессоренной частей (определялись методом аналогий, на основе известных параметров для автомобилей-аналогов).

В совокупности это могло определенным образом повлиять на результаты моделирования. В этой связи необходимым является проведение дополнительных исследований и определение чувствительности модели к изменению того или иного параметра.

Проведенные исследования показали, что комплексное использование результатов дорожных испытаний и компьютерного моделирования позволяет выполнять широкий спектр работ по оценке свойств управляемости и устойчивости легких коммерческих автомобилей. Однако важным является четкое обоснование и выбор параметров виртуальной модели, существенным образом влияющих на достоверность имитации характера поведения реального объекта.

Библиографический список

1. **Мусарский, Р.А.** Математические модели колёсных экипажей: учеб. пособие / Р.А. Мусарский; ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2008. – 163 с.
2. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учебник для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
3. **Тумасов, А.В.** Исследование свойств активной безопасности автобуса среднего класса методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов, С.Ю. Костин, В.А. Колтунов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1 (94). С. 134–142.
4. **Грошев, А.М.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.М. Грошев, В.Г. Дыгало, А.В. Тумасов [и др.] // Журнал ААИ. 2011. №2. С. 34–37.
5. **Костин, С.Ю.** Сравнительная оценка моделирования и дорожных испытаний управляемости и устойчивости автобуса / С.Ю. Костин, Р.А. Мусарский, В.Н. Кравец // Журнал ААИ. 2012. №6. С. 35–39.
6. **ГОСТ Р 52302-2004** «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания». – М., 2004.

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

G.A. Konikova¹, P.V. Sereda², Y.P. Trusov¹, K.M. Shashkina¹

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHT COMMERCIAL VEHICLES ACTIVE SAFETY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alxseev ¹,
GAZ Group, division “Light commercial vehicles”²

Purpose: Estimating of light commercial vehicle behavior in road turning conditions that are regulated by GOST R 52302-2004 on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of SDK.Simulation software as well as road testing methodology.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of light commercial vehicles steer ability and stability at the initial stages of design.

Research limitations/implications: Present study provides a starting-point for development of methodology of improving of vehicles active safety by means of effective design solutions as well as using of advanced driver assistance systems.

Originality/value: The main peculiarity of the study is using of advantages of simulation and real road tests for predicting of vehicles active safety and analyzing of possible solutions for improving of vehicles stability.

Key words: light commercial vehicle, suspension, simulation, steer ability, stability, road test.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 533.6.011.5

Е.А. Косолапов¹, М.Д. Соленников²

КВАЗИОДНОМЕРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В КАНАЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²

На основе общих интегральных уравнений законов сохранения получена математическая модель для течений сплошных сред в одномерном приближении для каналов переменного сечения. Это приближение позволяет учитывать различные явления на стенках канала, например, изменение геометрии канала с течением времени, впрыск или отсос газа через стенки и т.д.

Ключевые слова: течение газа, специальное одномерное приближение, каналы переменного сечения, интегральные и дифференциальные уравнения, явления на стенках.

В технических науках важное значение имеют предварительные упрощенные расчеты. С одной стороны, они требуют минимальных затрат, а с другой - позволяют получить приближенные значения основных параметров. Это дает возможность уже на первоначальном этапе, либо отказаться от задуманных конструктивных решений, либо идти дальше – применять более сложные расчетные алгоритмы или переходить к экспериментальным конструкциям. Для расчетов течений сплошных сред (газов, жидкостей, двухфазных сред и т.д.) используется так называемое одномерное приближение [1], которое в сущности не является таковым. В частности, для одномерного приближения из стационарного уравнения неразрывности должно бы следовать

$$\operatorname{div} \rho \vec{v} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dx}(\rho v) = 0 \Rightarrow \rho v = \text{const}, \quad (1)$$

где ρ - плотность, \vec{v} и v - скорость и ее проекция на ось x .

В монографии [1] аналогом этого уравнения является закон постоянства расхода

$$\rho v S = \text{const}, \quad (2)$$

где S - площадь поперечного сечения канала.

Очевидно, что выражения (1) и (2) противоречат друг другу. В дальнейшем будем называть приближение, из которого, в частности, следует формула (2) – подобным одномерному или *квазиодномерным* приближением (КОП). Заметим, что при $S = \text{const}$ эти приближения совпадают. Таким образом, несмотря на то, что в КОП все параметры зависят от одной пространственной координаты, это приближение как бы «чувствует» наличие стенок канала, их влияние на газ и изменение их геометрии. В связи с этим возникают вопросы, можно ли в этом приближении учитывать: изменение геометрии канала с течением времени, впрыск или отсос газа через стенки, теплообмен через них и т.п.

В данной работе делается попытка ответить на эти и другие вопросы в положительном смысле.

Интегральные уравнения

Исходными уравнениями для описания течения газа являются интегральные уравнения законов сохранения для произвольного выделенного объема [2]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = \oint \rho(\bar{v}\bar{n})dS, & (3) \\ -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho\bar{v}dV = \oint \rho\bar{v}(\bar{v}\bar{n})dS + \oint p\bar{n}dS, & (4) \\ -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho e dV = \oint \rho e(\bar{v}\bar{n})dS + \oint p(\bar{v}\bar{n})dS, & (5) \end{cases}$$

где p – давление; $e = v^2/2 + u$ – удельная полная энергия; u – удельная внутренняя энергия; \bar{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности; t – время; V – объем; S – площадь.

Поверхностные интегралы в (3)...(5) берутся по замкнутой поверхности вокруг выделенного объема.

Для упрощения в этих уравнениях не учитываются: вязкость, перенос тепла излучением и теплопроводностью и сила тяжести. Это является естественным для быстрых невысокотемпературных течений газа.

Так как неизвестных параметров в приведенных уравнениях четыре (ρ, \bar{v}, p, e), то для замыкания этой системы используется уравнение состояния. Для идеального газа оно имеет вид

$$p = (k - 1)\rho\left(e - \frac{v^2}{2}\right), \quad (6)$$

где k – показатель адиабаты.

Отметим, что интегральные уравнения (3)–(5) являются более общими, чем дифференциальные. В частности, для разрывных течений газа дифференциальные уравнения вообще теряют смысл. Кроме того, интегральные уравнения являются более удобными для численного решения [3, 4]. Дифференциальные уравнения получаются из интегральных при стремлении выделенного объема к нулю. Правда, устремлять объем к нулю можно по-разному, как это будет показано далее.

Предлагаемое КОП будем применять для течений газа в плоско- или осесимметричных каналах (рис. 1) со слабо изменяющейся образующей.

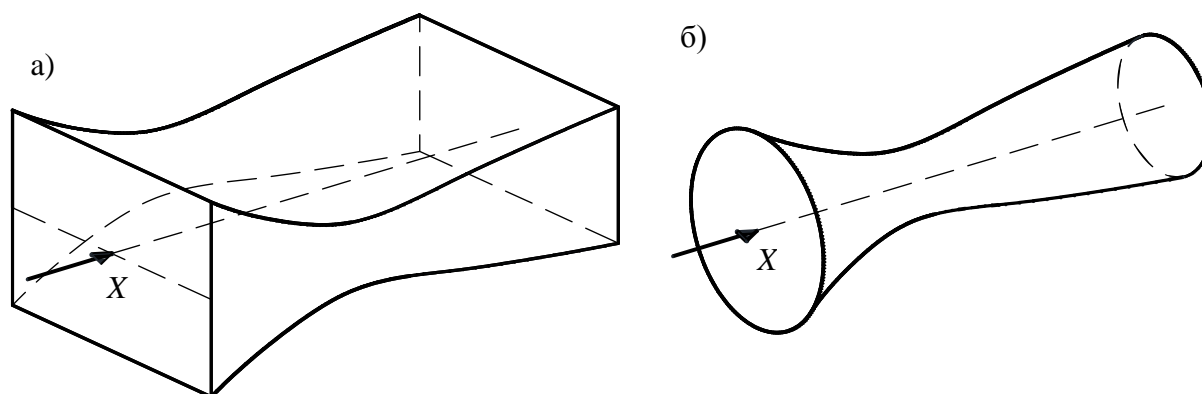


Рис. 1. Геометрия каналов для применения КОП
а, б - плоско- и осесимметричные каналы соответственно

Основным определением КОП является допущение, что все параметры газа в любом поперечном сечении канала (перпендикулярном оси X на рис. 1) остаются постоянными.

Понятно, что чем плавнее изменяется образующая, тем точнее будет это приближение.

Процедура спрямления каналов, т.е. преобразования изогнутых каналов к виду, показанному на рис. 1, описана в работе [5]. В этом случае точность КОП снижается, но по-прежнему остается приемлемой.

Отметим еще одну особенность, следующую из определений КОП, постоянство по сечению векторной величины – скорости. Из этого следует, что она постоянна не только по величине, но и по направлению. Следовательно, вектор скорости коллинеарен оси X . Это кажется не соответствующим действительности на стенках канала, но именно правильная интерпретация интегральных уравнений позволяет устранить кажущиеся противоречия.

Для вывода уравнений КОП рассмотрим уравнения (3)–(5) не для произвольного объёма, а для объёма между двумя торцевыми плоскостями (ТП), состоящими из левой (ЛТП) и правой (ПТП) и боковой поверхностью (БП) стенки, как показано на рис. 2.

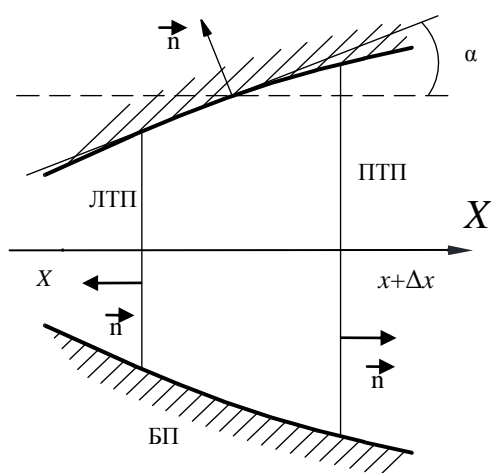


Рис. 2. Выделенный объём канала с условными обозначениями

Интегралы по замкнутой поверхности в (3)...(5) можно представить в виде

$$\oint dS = \int_{ТП} dS + \int_{БП} dS = \int_{ЛТП} dS + \int_{ПТП} dS + \int_{БП} dS. \quad (7)$$

Рассмотрим физический смысл поверхности интегралов в уравнениях (3) – (5). Первые интегралы в правых частях представляют собой потоки массы, импульса и энергии, связанные с перетеканием газа через границы объёма. Если перетекания через стенки канала нет, что чаще всего и бывает, то интегралы по БП надо приравнять к нулю.

Второй интеграл в правой части уравнения (4) представляет собой силу, с которой внешняя среда действует на газ с давлением p . Так как стенка остается неподвижной, следовательно, она действует на газ с такой же силой, как и газ действует на нее. Таким образом, второй поверхностный интеграл в (4) надо брать и по БП.

Второй поверхностный интеграл в уравнении (5) представляет собой работу силы, с которой стенка действует на газ. Так как перемещения стенки нет, то эта работа равна нулю и интеграл по БП в этом случае тоже равен нулю.

Найдем проекцию на ось X единственного остающегося интеграла по БП. Из рис. 2 видно, что $\text{Пр}_x \vec{n} = -\sin \alpha(x)$, где функция $\alpha(x)$ представляет собой острый угол между касательной к БП в данной точке и осью X (рис. 2). Тогда будет справедливо следующее равенство:

$$\text{Пр}_x \int_{БП} p \vec{n} dS = - \int_{БП} p \sin \alpha dS. \quad (8)$$

Таким образом, интегральные уравнения (3)–(5) для КОП можно записать в следующем виде

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV &= \int_{ТП} \rho v dS, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho v dV &= \int_{ТП} \rho v^2 dS + \int_{ТП} p dS - \int_{БП} p \sin \alpha dS, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho e dV &= \int_{ТП} \rho e v dS + \int_{ТП} p v dS. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Учитывая направление внешней нормали (см. рис. 2), скалярные произведения в (3)–(5) на ЛТП будут иметь знак минус

$$\int_{\text{ТП}} dS = \int_{\text{ПТП}} dS - \int_{\text{ЛТП}} dS. \quad (12)$$

Уравнения (9)–(12) вместе с уравнением (6) представляют собой замкнутую систему интегральных уравнений в КОП.

В случае меняющейся геометрии канала (например, при выгорании внутренней теплоизоляции в соплах двигателя), при впрыске или отсосе газа через стенки, при наличии теплообмена через них, в уравнения (9)...(11) надо вводить соответствующие интегралы по БП.

Дифференциальные уравнения

Для получения дифференциальных уравнений КОП из уравнений (9)–(12) будем полагать, что левая и правая торцевые плоскости проходят через точки x и $x+\Delta x$ соответственно (рис. 2). Далее будем сближать эти поверхности, т.е. $\Delta x \rightarrow 0$. Аппроксимируем входящие в (9)–(12) интегралы с точностью до Δx .

Очевидно, что объёмные интегралы от произвольной функции f с указанной точностью можно представить в следующем виде:

$$\int f dV \approx f S \Delta x, \quad (13)$$

где функция $S(x)$ имеет значение площади поперечного сечения канала в точке x .

Для интегралов по торцевым сечениям будет иметь

$$\int_{\text{ЛТП}} f dS = f(x) S(x) \quad (14)$$

и

$$\int_{\text{ПТП}} f dS = f(x + \Delta x) S(x + \Delta x). \quad (15)$$

Раскладывая выражение (15) в ряд Тейлора с точностью до Δx , получим

$$\int_{\text{ПТП}} f dS \approx f(x) S(x) + \frac{\partial(fS)}{\partial x} \Delta x. \quad (16)$$

Учитывая формулы (12), (14) и (16), выражение для поверхностных интегралов по торцевым сечениям примет вид

$$\int_{\text{ТП}} f dS \approx \frac{\partial(fS)}{\partial x} \Delta x. \quad (17)$$

Вычислим с точностью до Δx интеграл по БП в уравнении (10). Обозначим функцию, задающую образующую канала $F(x)$. С учетом того, что производная от нее есть $\text{tg} \alpha$, можно найти выражение для $\sin \alpha$:

$$\sin \alpha = \frac{F'}{\sqrt{1 + F'^2}}. \quad (18)$$

Рассмотрим два случая: плоско- и осесимметричный.

Таблица 1

<p>Плоскосимметричный Площадь боковых поверхностей можно выразить через длину дуги: $2l \int_x^{x+\Delta x} \sqrt{1+F'^2} dx,$ где l – размер канала в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 2.</p>	<p>Осесимметричный Площадь боковой поверхности, образованная вращением графика функции $F(x)$ вокруг оси x: $2\pi \int_x^{x+\Delta x} F \sqrt{1+F'^2} dx.$</p>
<p>С учетом (18) можно записать выражение для интеграла $\int_{\text{БП}} p \sin \alpha dS$ в следующей форме:</p>	
$2l \int_x^{x+\Delta x} p F' dx$	$2\pi \int_x^{x+\Delta x} p F F' dx$
<p>Раскладывая эти выражения в ряд Тейлора с точностью до Δx, получим</p>	
$2lpF' \Delta x$	$2\pi p F F' \Delta x$
<p>Учитывая что функция $F(x)$ может быть выражена через функцию $S(x)$:</p>	
$F(x) = \frac{S(x)}{2l}$	$F(x) = \sqrt{\frac{S(x)}{\pi}}$

Окончательно получаем для обоих случаев

$$\int_{\text{БП}} p \sin \alpha dS \approx p \frac{dS}{dx} \Delta x. \tag{19}$$

Таким образом, с учетом выражений (13), (17) и (19), система интегральных уравнений (9)...(11) перейдет в следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v S) = 0, \end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2 S) + S \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v e S) + \frac{\partial}{\partial x}(p v S) = 0. \end{cases} \tag{22}$$

Если геометрия канала не меняется с течением времени $\partial S / \partial t = 0$, то после преобразования получим систему дифференциальных уравнений для нестационарных течений в КОП для этого случая:

$$\begin{cases} S \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v S) = 0, \end{cases} \tag{23}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial t} + v \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{1}{\rho S} \frac{\partial}{\partial x}(p v S) = 0. \end{cases} \tag{25}$$

Системы уравнений (20)...(22) и (23)...(25) должны быть дополнены уравнением состояния (6).

Стационарные течения

Для стационарных течений все параметры газа не зависят от времени $\partial/\partial t = 0$ и становятся функцией только x . Тогда, с введением функции обобщенного давления

$$\mathfrak{R} = \int \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (26)$$

систему уравнений (23)...(25), (6) можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx}(\rho v S) = 0, \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2} + \mathfrak{R} \right) = 0, \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) = 0, \end{array} \right. \quad (29)$$

$$e = \frac{v^2}{2} + \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho}. \quad (30)$$

Уравнение (27), являющееся следствием закона сохранения массы, представляет собой уравнение сохранения расхода. Следствие закона сохранения импульса, уравнение (28), называют *обобщенным уравнением Бернулли*. В научной и учебной литературе очень часто ошибочно его считают следствием закона сохранения энергии.

Преобразуем уравнение (29), являющееся следствием закона сохранения энергии. Для этого воспользуемся уравнением (28) и выражениями (26), (30). Тогда получим

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = 0. \quad (31)$$

После дифференцирования первого члена этого уравнения и дополнительных преобразований будем иметь

$$\frac{d}{dx} \left(\ln \frac{p}{\rho^k} \right) = 0. \quad (32)$$

Из выражения (32) следует уравнение адиабаты Пуассона:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const}. \quad (33)$$

Отметим, что уравнение (33) является следствием закона сохранения энергии, хотя при его выводе использовались выражения и для других законов сохранения.

Применяя (33), можно вычислить обобщенное давление (26):

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho}. \quad (34)$$

Имея в виду (33), (34), система уравнений (27)–(30) может быть записана в алгебраическом виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho v S = \text{const}, \end{array} \right. \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v^2}{2} + \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho} = \text{const}, \end{array} \right. \quad (36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{p}{\rho^k} = \text{const}. \end{array} \right. \quad (37)$$

Неизвестными в системе уравнений (35)–(37) являются параметры ρ , ν , p . Если необходимо найти какую-либо энергетическую характеристику, например, температуру, то для этого надо использовать уравнение состояния (30).

Система уравнений (35)–(37) известна [1]. Она является трансцендентной, и решить её можно только численными методами. Чаще всего её сводят к одному трансцендентному уравнению для числа Маха или скоростного коэффициента, решения которого давно затабулированы. Все остальные параметры выражаются через газодинамические функции.

Выводы

1. Из самых общих уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии получены системы нестационарных интегральных и дифференциальных уравнений течения газа в КОП.

2. Полученные системы могут распространяться на случаи изменения геометрии канала с течением времени. Они могут использоваться для высокотемпературных многофазных течений в соплах ракетных двигателей с выгоранием заряда и внутренней теплозащиты.

3. Уравнение закона сохранения массы позволяет учитывать впрыск или отсос сплошной среды через стенки канала. Подобный эффект может учитываться при выпадении жидкой фазы на стенки [6].

4. Интегральная система уравнений дает возможность учитывать дополнительные процессы, например, такие как радиационный перенос энергии [7], фазовые переходы [8] и т.п.

5. Показано, что в стационарном случае уравнение Бернулли является следствием закона сохранения импульса, а не энергии, как это часто встречается в литературе. Следствием же закона сохранения энергии при принятых допущениях является уравнение адиабаты Пуассона.

Таким образом, КОП является мощным инструментом для первоначального расчета сложных течений в каналах с разнообразными дополнительными явлениями.

Работа выполнена при поддержке научно-технической программы Минобрнауки РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» [9].

Библиографический список

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. Т. VI. – 736 с.
3. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газодинамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
4. Давыдов, Ю.М. Численное моделирование двухфазных течений в соплах методом крупных частиц / Ю.М. Давыдов, Е.А. Косолапов. – М.: Нац. академия прикладных наук, 1998. – 86 с.
5. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
6. Косолапов, Е.А. Учет выпадения капель на стенки канала при математическом моделировании дисперсных течений в квазиодномерном приближении // Проблемы автоматизации исследований и проектных решений в судовой энергетике: межвуз. сб. науч. тр. / ГПИ. – Горький, 1990. С. 77–81.
7. Клабуков, В.Я. Численное исследование высокотемпературных дисперсных течений с излучением в соплах Лавля / В.Я. Клабуков, Е.А. Косолапов, Л.Т. Гребенщиков // Теплообмен – ММФ. Проблемные доклады. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова АН. БССР, 1988. С. 153–164.
8. Косолапов, Е.А. Численное исследование двухфазного течения по тракту газотурбинного двигателя, форсированного впрыском воды / Е.А. Косолапов, А.В. Малахов, А.Г. Мореплавец // Изв. вузов. Машиностроение, 1995. № 1–3. С. 40–43.

9. **Косолапов, Е.А.** Направления развития численного моделирования процессов в соплах ракетных двигателей на твердом топливе // Выставки подпрограммы 205 «Транспорт: тез. докл. отч. конф. Научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники / Московский государственный авиационный институт. – М., 2002. С. 97–98.

*Дата поступления
в редакцию 20.09.2013*

E. Kosolapov¹, M. Solennikov²

QUASI ONE-DIMENSIONAL APPROACH GAS FLOWS CALCULATION IN POWER PLANT CHANNELS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
OKBM Africantov²

Purpose: Special one-dimensional approximation to be called quasi-one is often used to describe the gas flow in channels with variable section. This approach takes into account the gas-penetration through the wall of the channel. The purpose of the paper is to derive more general equations using this approach with the possibility to account the other phenomena near channel walls.

Design/methodology/approach: The mathematical model equations are the laws of mass conservation, momentum and energy presented in integral form. These equations are written for the volume between two cross-sections and the walls of the channel.

Findings: The integral and differential equations to describe the gas flow in the quasi one-dimensional approximation for the transient and steady-state cases. These equations allow to take into account such effects as changing the channel geometry over time, the injection or suction gas through the channel wall. This approach can be extended to multi-phase flow.

Originality/value: The proposed approach allows to do preliminary calculations for a wider range of tasks.

Key words: gas flow, a special one-dimensional approximation, the channels of variable cross section, integral and differential equations, conditions at the walls.

УДК 629.124.791.2.039

В.А. Зуев¹, Н.М. Семенова¹, В.А. Кравченко²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕДОКОЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ В МЕЛКОБИТЫХ ЛЬДАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «КИТ»²

Приводятся результаты модельных исследований ледокольной платформы на воздушной подушке в мелкобитых льдах. Анализируется влияние давления в воздушной подушке, расхода воздуха, сплоченности битого льда и соотношения длины воздушной подушки к ширине на сопротивление. Приводятся аппроксимирующие зависимости.

Ключевые слова: лед, ледокольная платформа на воздушной подушке, сопротивление, экспериментальные исследования.

Оценка сопротивления платформы на воздушной подушке (ПВП) в мелкобитом льду не менее затруднительная, чем в чистой воде. Это связано как с нестабильностью физико-механических и геометрических параметров льда [1], так и со стохастическим характером взаимодействия льдин с гибким ограждением (ГО). В этих условиях для прогнозирования сопротивления наиболее надежен способ испытания моделей в бассейнах с моделирующим ледовым покрытием и последующим пересчетом результатов на натуре.

Сопротивление ПВП в мелкобитом льду представим следующим образом:

$$R = R_{\text{ст}} + R_{\text{д}}. \quad (1)$$

Можно полагать, что статическая составляющая сопротивления $R_{\text{ст}}$ зависит от давления в воздушной подушке (ВП) и трения материала ГО о поверхность льда, а также от толщины и протяженности льда и не зависит от скорости. Динамическая составляющая $R_{\text{д}}$, к которой отнесем и сопротивление воды, обусловлена скоростным воздействием битого льда на ПВП [2].

Составляющие сопротивления приведены на рис. 1.

Скорость движения ледокольной платформы на воздушной подушке (ЛПВП) не велика (до 12 км/ч), поэтому остальными составляющими ввиду их малости можно пренебречь.

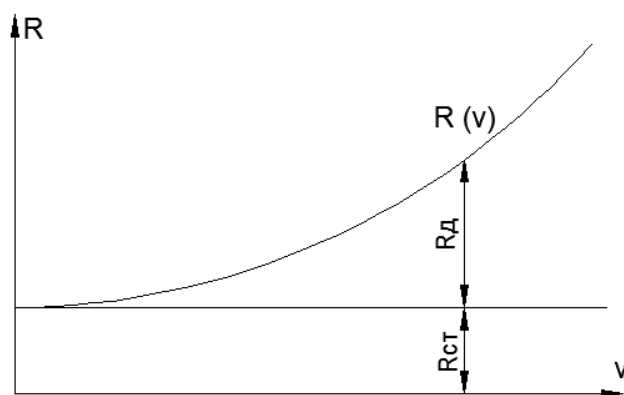


Рис. 1. Составляющие сопротивления:

$R(v)$ – сопротивление ПВП в битом льду; v – скорость ПВП;

$R_{\text{ст}}$ – статическая составляющая сопротивления; $R_{\text{д}}$ – динамическая составляющая сопротивления

Испытания в битом льду проводились в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) в среде плиток из полиэтилена высокого давления, покрывающих свободную поверхность воды. Под мелкобитым льдом понимаются обломки, полученные, например, после движения ледокола, когда происходит разрушение ледяного покрова (в основном от изгиба) и размеры льдин не превышают 4÷5 толщин.

Анализ природы действующих на ЛПВП сил при движении в мелкобитом льду и условий их подобия позволяет установить:

$$Fr = idem; \quad \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem; \quad f = idem, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность льда и воды; f – коэффициент трения материала ГО о модель льда,

$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ – число Фруда; v – скорость движения; L – длина судна по воздушной подушке;

g – ускорение свободного падения.

Плотность полиэтилена высокого давления $\rho_{\text{л}}=0,92$ т/м³, коэффициент трения о поверхность ГО $f=0,20 \div 0,22$, что соответствует условиям (2).

При выполнении этих условий ледовое сопротивление можно определить по закону подобия Фруда (силы по куду линейного масштаба, скорости по корню квадратному из линейного масштаба).

Однако на практике моделирование движения в битых льдах встречает известные трудности [2]. Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают невозможным достаточно точно и определённо зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку. Вследствие этого не удастся выполнить все условия подобия при моделировании ледовой среды. По этим причинам, а также из-за необходимости обеспечить повторяемость среды в процессе эксперимента приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с определенными характеристиками. При этом условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных параметров битого льда: толщины и протяженности льдин, сплоченности и ширины канала битого льда, плотности и коэффициента трения материала, имитирующего битый лед о поверхность ГО. Форма отдельных льдин [2] практически не влияет на ледовое сопротивление при данной сплоченности, толщине и протяженности льдин. Это позволяет моделировать битый лед с помощью пластинок одинаковой правильной формы.

При испытаниях моделей варьировались: давление в ВП ($P_{\text{ВП}}$); толщина льда (h); протяженность льдин ($l=4h$); расход воздуха из ВП (Q); сплоченность битого льда (\bar{S}). Эти испытания проводились с моделью №1 (базовой)

Для оценки влияния длины ВП $L_{\text{ВП}}$ к ширине $B_{\text{ВП}}$ проводились испытания моделей №2, 3, 4. Эти испытания проходили только в воде. Характеристики моделей приведены в табл. 1. Фрагмент испытания модели приведен на рис. 2.

Таблица 1

Главные размерения моделей ЛПВП

Номер модели	Длина ВП $L_{\text{ВП}}$, м	Ширина ВП $B_{\text{ВП}}$, м	Высота бор-та H , м	L/B	Высота ГО, м
1	0,80	0,70	0,10	1,14	0,060
2	0,366	0,366	0,045	1,0	0,045
3	0,359	0,366	0,045	1,52	0,045
4	0,366	0,559	0,045	0,65	0,045



Рис. 2. Фрагмент испытания ЛПВП в чистой воде

Сопротивление ЛПВП можно представить в виде:

$$R = f \left(P_{вп}, S_{вп}, \rho_{л}, \rho_{в}, Q, v, s, h, \frac{L_{вп}}{B_{вп}} \right), \quad (3)$$

где $P_{вп}$ – давление в ВП; $S_{вп}$ – площадь ВП; $\rho_{л}$, $\rho_{в}$ – плотность льда и воды; Q – расход воздуха из ВП; v – скорость движения; h – толщина льда; \bar{S} – функция сплоченности льда ($\bar{S} = 0; 0,1; 0,2; \dots 1,0$).

В безразмерной комбинации (3) можно переписать так:

$$\frac{R}{P_{вп} \cdot S_{вп}} = \prod_{i=1}^k f_i^{m_i}, \quad (4)$$

где $f_i^{m_i}$ – безразмерные комплексы, составленные из определяющих параметров, соответствующих процессу взаимодействия ЛПВП с окружающей средой. Предполагается, что эти параметры можно считать взаимонезависимыми [3].

Комбинацию этих параметров можно записать в виде:

$$\frac{R}{P_{вп} \cdot S_{вп}} = f_1(Fr_V)^{m_1} \cdot f_2(\bar{q})^{m_2} \cdot f_3(h)^{m_3} \cdot f_4(\bar{S}) \cdot f_5 \left(\frac{L_{вп}}{B_{вп}} \right)^{m_5}, \quad (5)$$

где Fr_V – число Фруда по объемному водоизмещению, определяется по формуле:

$$Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g \cdot 3 \frac{m}{\rho_{в}}}}, \quad (6)$$

где m – масса модели; \bar{q} – безразмерный расход, определяемый как:

$$\bar{q} = \frac{Q}{S_{вп}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{вп}}{\rho_{возд}}}, \quad (7)$$

где $\rho_{возд}$ – плотность воздуха

Задачей эксперимента было оценить функции $f_i^{m_i}$

Особенностью ЛПВП являются низкие скорости движения и относительно малые расходы воздуха [4]. Поэтому приближенно можно считать, что нижняя кромка ГО совпадает с

дном воздушной впадины $h_{ВП}$ ($h_{ВП} = \frac{P_{ВП}}{\rho_{в} \cdot g}$).

На рис. 3 приведены экспериментальные точки сопротивления модели №1 в сплоченном битом льду ($\bar{s}=1,0$) толщиной 20мм и размерами плиток в плане 80x80мм при разных давлениях и расходе воздуха $Q=0,028\text{м}^3/\text{с}$.

Представим сопротивление в виде суммы статической и динамической составляющей (1). Статическую составляющую (при $v \rightarrow 0$) можно аппроксимировать зависимостью:

$$R_{ст} = f_1' \cdot P_{вп} \cdot S_{вп}, \quad (8)$$

где $f_1' = 0,020$ – эмпирический коэффициент.

Используя графики рис. 3, безразмерную величину динамической составляющей f_1'' можно аппроксимировать в виде:

$$f_1'' = \frac{m}{\rho_{в} \cdot B_{вп} \cdot S_{вп}}; \quad (9)$$

$$f_1'' = 8,45 \cdot Fr_V^{1,4}. \quad (10)$$

Таким образом, безразмерный параметр f_1 определится так:

$$f_1 = (f_1' + f_1'') = (0,020 + 8,45 \cdot Fr_V^{1,4}) \pm 0,04. \quad (11)$$

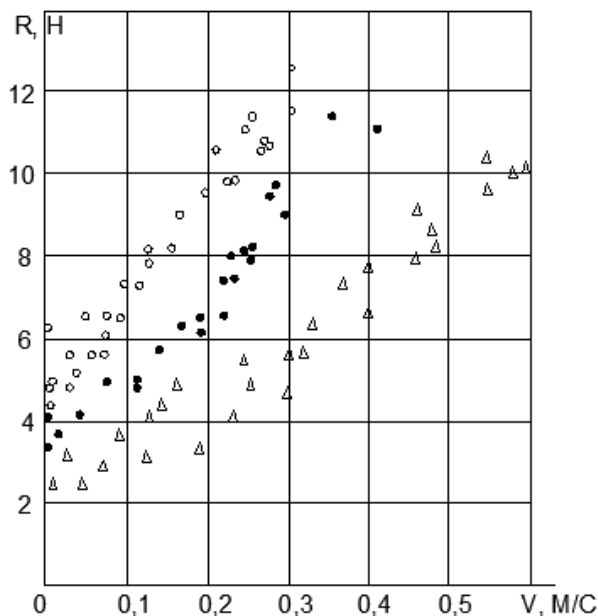


Рис. 3. Сопротивление модели в битом льду 10-балльной сплоченности:

○ - $P_{ВП} = 438\text{Па}$; ● - $P_{ВП} = 350\text{Па}$; Δ - $P_{ВП} = 263\text{Па}$

Зависимость $f_1(Fr_V)$ при расходе $Q=0,028\text{ м}^3/\text{с}$ от числа Фруда приведена на рис. 4.

Для оценки влияния расхода были проведены испытания модели в поле битого льда десятибалльной сплоченности при безразмерных расходах, равных 0,0024; 0,0029; 0,0033. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

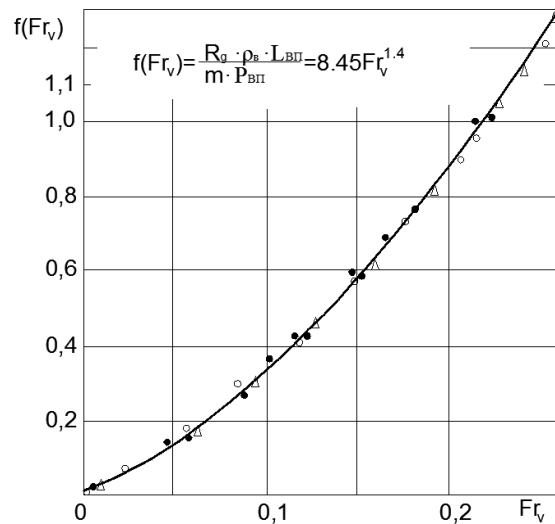


Рис. 4. Безразмерная составляющая сопротивления в битом льду:
 ○ - $P_{ВП} = 438 \text{ Па}$; ● - $P_{ВП} = 350 \text{ Па}$; △ - $P_{ВП} = 263 \text{ Па}$

Безразмерную функцию $f_2\left(\bar{q}\right)$ для приближенной оценки влияния расхода на сопротивление можно аппроксимировать функцией:

$$f_2\left(\bar{q}\right) = 1.38 - 131 \cdot \bar{q} \pm 0.06 \cdot \bar{q} \quad (12)$$

Функция справедлива в диапазоне $0,0024 \leq \bar{q} \leq 0.0038$.

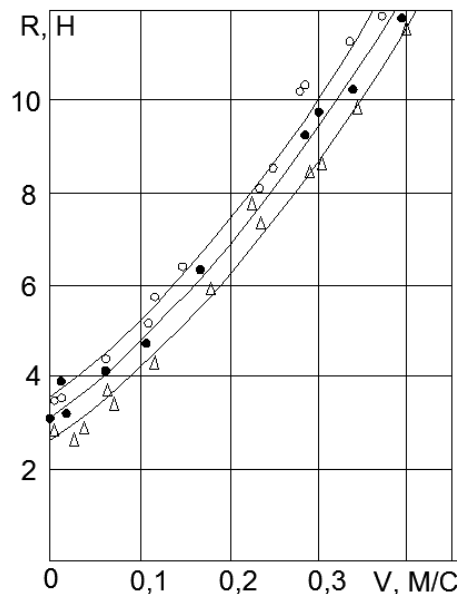


Рис. 5. Зависимость сопротивления ЛПВП (массой 20 кг) от расхода в поле битого сплоченного льда:
 ○ - $\bar{q} = 0.0024$; ● - $\bar{q} = 0.0028$; △ - $\bar{q} = 0.0034$

Результаты испытаний приведены на рис. 6.

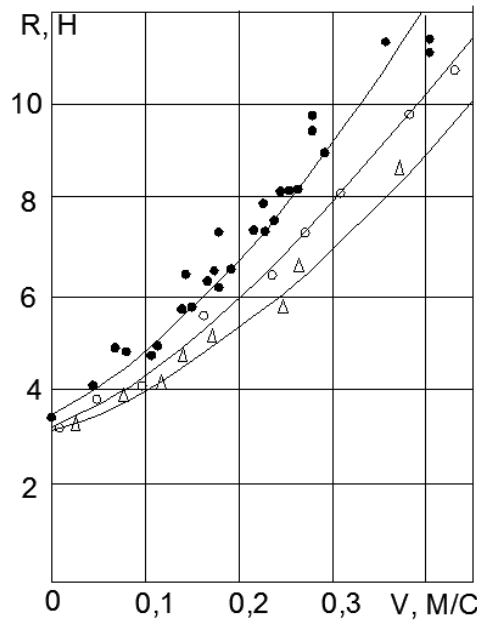


Рис. 6. Сопротивление модели ПВП массой 20кг в сплоченном битом льду:
 • - толщина льда =20 мм; ○ - толщина льда =16 мм; Δ - толщина льда =12 мм

Обработка результатов для безразмерного параметра $f_3\left(\frac{-}{h}\right)$ привела к результатам:

$$f_3\left(\frac{-}{h}\right) = 1,28 \cdot \frac{-}{h} \pm 0,05, \tag{13}$$

где $\frac{-}{h} = \frac{h \cdot \rho_{\text{л}} \cdot g}{P_{\text{вп}}}$, $0 < h \leq 0,9$.

Для оценки влияния сплоченности битого льда на сопротивление были проведены испытания модели №1 массой 20 и 25кг в битом льду сплоченностью 10,8,6 и 4 балла (соответственно функции сплоченности $\frac{-}{s} = 1.0; 0.8; 0.6$ и $0,4$). Результаты испытаний приведены на рис. 7.

Необходимо отметить, что при малых скоростях движения модели к полученным результатам надо относиться осторожно. Видимо, из-за значительного трения о лед и малого сопротивления обломков при низких скоростях происходило их вовлечение (из-за касательных сил) в движение вместе с моделью. Это относится к движению в разреженных льдах. При скоростях $Fr_V > 0.05$ этого явления не наблюдалось.

Влияние сплоченности льда на сопротивление выявить сложнее в силу отмеченных обстоятельств и стохастического характера взаимодействия. Анализ показывает, что приближенно можно записать:

$$f_4\left(\frac{-}{s}\right) = \frac{\left(\frac{-}{s}\right)^{0.75}}{2 - s} \pm 0.05. \tag{14}$$

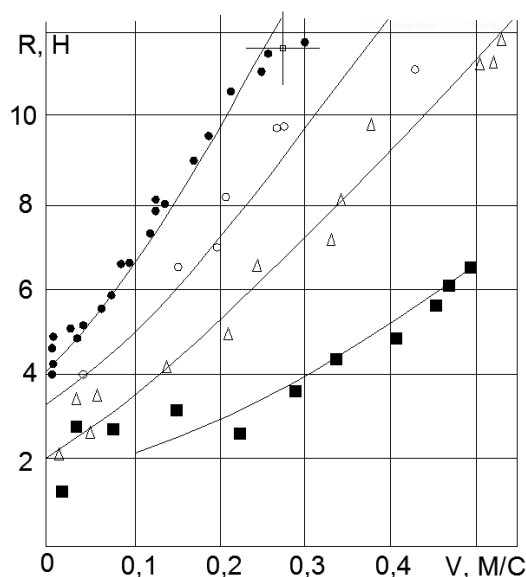


Рис. 7. Сопротивление модели в поле битого льда. Масса модели 25 кг:

- - сплоченность = 10 баллов; ○ - сплоченность = 8 баллов; △ - сплоченность = 6 баллов;
- - сплоченность = 4 балла

На рис. 8 приведена безразмерная функция $f_4\left(\frac{-}{s}\right)$.

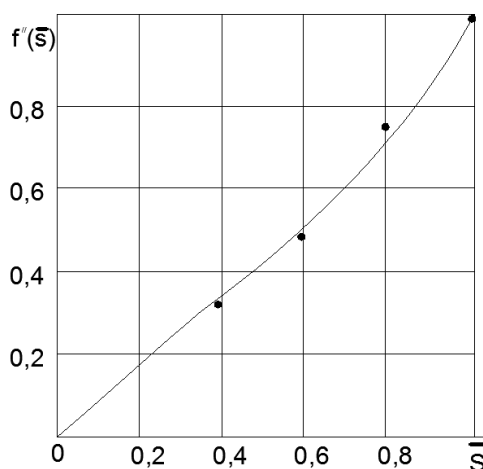


Рис. 8. Зависимость функции $f_4\left(\frac{-}{s}\right)$ от сплоченности льда:

- - эксперимент; — - аппроксимация

В опытах с моделями №2, 3, 4 исследовалось влияние отношения $L_{вп}/B_{вп}$ на сопротивление моделей. Эти отношения находились в пределах $0,65 \leq L_{вп}/B_{вп} \leq 1,52$. Испытания проводились на чистой воде [6]. При этом имелось в виду, что отношение $L_{вп}/B_{вп}$ при движении в мелкобитом льду и в воде будут одинаково влиять на сопротивление.

Кривые сопротивления приведены на рис. 9. Безразмерный параметр $f_5(L_{вп}/B_{вп})$ получен в виде:

$$f_5\left(\frac{L}{B}\right) = 1,27 - 0,27 \cdot \left(\frac{L_{вп}}{B_{вп}}\right) \pm 0,01. \quad (15)$$

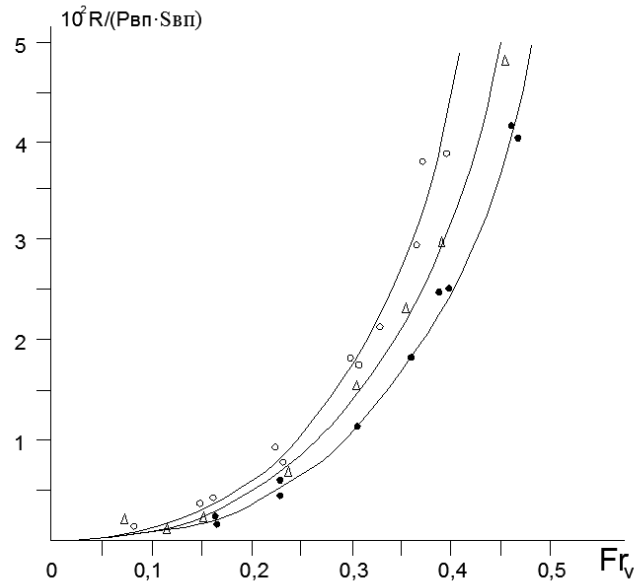


Рис. 9. Зависимость безразмерного сопротивления модели в воде:

Δ – модель №2; \bullet – модель №3; \circ – модель №4

Данных по натурным испытаниям ПВП в битом льду чрезвычайно мало. На рис. 10 показаны результаты расчета сопротивления в битом льду ПВП «ВП-1» и данные натурных испытаний [7].

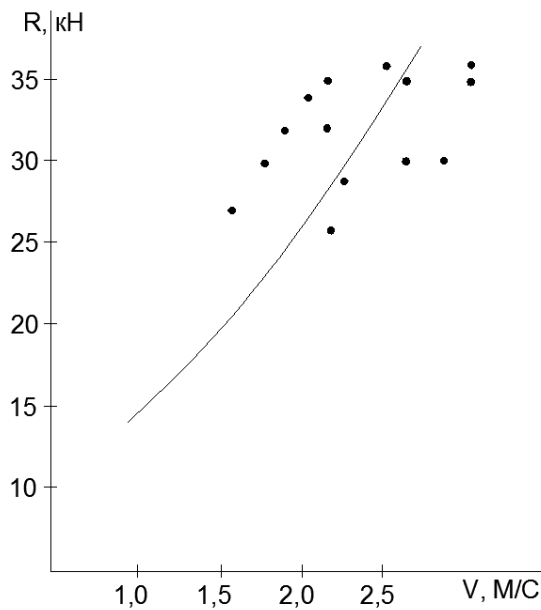


Рис. 10. Сопротивление ПВП ВП-1 в канале битого льда толщиной 0,3-0,35м ($P_{вп}=4,6\text{кПа}$, $m=61\text{т}$):

\bullet - эксперимент; — - расчет

Библиографический список

1. **Milano Y.R.** Resistance of a ship to slow continuous motion in ice when assisted by an air cushion vehicle. P. 47–94.
2. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.

3. Зуев, В.А. Новые технологии разрушения ледяного покрова и продление навигации судами на воздушной подушке // Вопросы морской ледотехники: тр. ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова. Вып. 34(318). – СПб., 2007. С. 78–97.
4. Колызаев, В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / В.А. Колызаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиенко. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
5. Кличко, В.В. Гидроаэродинамика амфибийных судов на воздушной подушке. Поддержание и остойчивость / В.В. Кличко. – СПб.: ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова, 2012. Т. 1. – 242 с.
6. Зуев, В.А. Модельные испытания ледокольных платформ на воздушной подушке на тихой воде / В.А. Зуев, Н.М. Семенова // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: СПГУВК, 2012. Вып. 1. С. 125–132.
7. Ледовые испытания несамходной платформы на воздушной подушке «ВП-1» в акватории порта Турку 8.-9.3.1982. Отчет № Б-59 Vadam, Хельсинки, 1982.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

V.A. Zuev¹, N.M. Semenova¹, V.A. Kravchenko²

EXPERIMENT RESEARCHES OF ICE-BREAKING AIR CUSHION PLATFORM ICE RESISTANCE IN BROKEN ICE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC “CIT”²

Purpose: The pressure influence in the air cushion, airflow, the broken ice concentration and L/B ration on resistance are analyzed.

Design/methodology/approach: The research is based on the experimental dates are made on the basis of a full-scale model tests. A theoretical framework is proposed based on mathematic simulation with an analysis of the physical processes that influence on the platform overall resistance. The model data presented in this research paper show the adequacy of the chosen model.

Findings: This available data can be applied in resistance forecasting of the ice-breaking air cushion platform to movement in broken ice in a first approximation.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research to know how such characteristics influence the resistance when icebreaking platform to movement in sludge ice.

Originality/value: For solving the optimal design problem of the air cushion platform is essential to know the resistance of the ship to movement both in clear water and ice. For the ice-breaking hovercrafts this problem consists of three tasks: defining ice-breaking resistance, defining resistance the air cushion platform which operates in the broken ice and defining water resistance. And this method presented could be useful for calculating resistance of icebreaking platform to movement at earlier stages of icebreaking air cushion platform design.

Key words: ice, icebreaking air cushion platform, resistance, experimental investigation.

УДК 629.12.011

В.С. Антонов¹, Е.М. Грамузов², В.А. Зуев², А.Г. Ларин², Ю.М. Трапезников¹**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВСПЛЫТИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ**ЦКБ «Малахит»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Экстренное всплытие подводного судна из-под льда возможно при создании разрушающего лед усилия за счет продувания цистерн главного балласта. Проломное усилие зависит от толщины льда, а возможность его создания – от запаса остойчивости судна. Теоретически первая часть проблемы не получила адекватного решения и в данной работе исследуется экспериментально. Вторая часть проблемы нуждается в рациональном выборе архитектурных решений, по которым даны некоторые рекомендации. Работа направлена на безопасность экипажей подводных судов, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях арктических морей.

Ключевые слова: подводное судно, ледовые условия, толщина льда, проломное усилие, экспериментальные исследования, запас остойчивости, архитектурные решения.

Всплытие подводного судна в сплошном ледяном поле может осуществляться, если прикладываемое ко льду вертикальное усилие превышает проломное усилие для ледяного покрова и подводное судно не теряет остойчивость. Под всплытием в данном случае будем понимать пролом сплошного ледяного покрова заданной толщины ограждением рубки, позволяющем безопасный выход экипажа на лед или другие возможности покинуть судно. Удовлетворяющее практику решение этой задачи пока не найдено ни аналитическими, ни численными методами. Поэтому была предпринята попытка ее решения с помощью физического моделирования.

Модельные испытания проводились в специальном ледовом опытовом стенде [1].

В число измеряемых величин были включены наиболее важные факторы, характеризующие одновременно и состояние взаимодействующей со льдом конструкции. К ним относятся вертикальное перемещение штампа, деформирующего ледяной покров и контактное усилие их взаимодействия.

Непрерывная запись во времени этих величин позволяет получить диаграмму деформирования ледяного покрова $P = f(w)$, т.е. зависимость между прогибом w в месте приложения нагрузки и вертикальным усилием P . Причем наиболее полную информацию дает диаграмма, полученная при кинематическом нагружении. В этом случае на всем протяжении деформирования (вплоть до полного пролома) сила, приложенная к ледяному полю, равна реакции пластины на инициированный прогиб. По такой диаграмме можно определить и рассчитать предельные прогиб и нагрузку, энергию разрушения, интегральные упругие характеристики, энергию образования трещин и т.д.

Для решения поставленных вопросов была разработана оригинальная высокопроизводительная методика проведения опытов. Экспериментальная установка описана в [1].

Теория моделирования и пересчет модельного эксперимента на натуру осуществлялись по проверенным схемам [1, 2, 3].

В опытах разрушения льда снизу использовался штамп $\varnothing = 240$ мм, который крепился к штоку динамометра. Штамп вмораживался в ледяной покров и соединялся со штоком $\varnothing 20$ мм, который перемещался вверх при включении машины.

Сигналы датчика перемещения регистрировались программно-аппаратным комплексом. Разработанные программные комплексы включают модуль калибровки датчиков силы и прогиба, модуль автоматической записи показаний датчиков, позволяющий реги-

стрировать показания без участия экспериментатора, и модуль обработки результатов опыта, который производит, пересчет безмерных показаний АЦП к размерным величинам, а также вычисление максимума нагрузки, интегральных характеристик диаграмм разрушения (работы для полного пролома льда), вычерчивает диаграмму разрушения и экспортирует результаты обработки в текстовые файлы. Программно-аппаратный комплекс предназначен для работы в среде Windows.

Результаты испытаний (зависимость максимальных усилий и прогибов при этих усилиях от толщины льда) приведены в табл. 1 и на рис. 1.

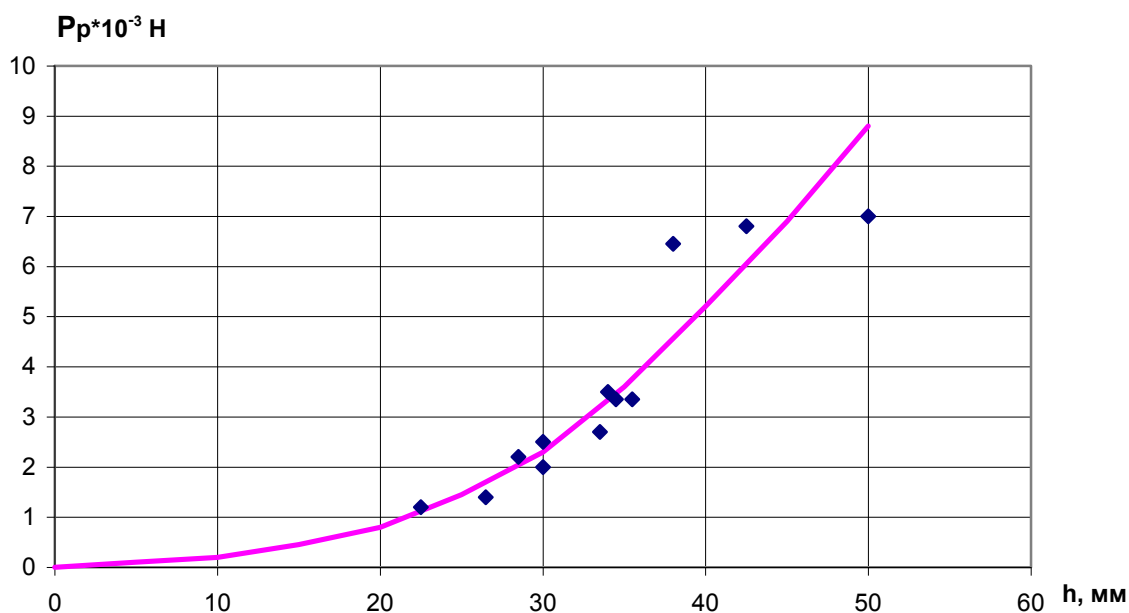


Рис. 1. Зависимость разрушающего усилия от толщины льда при разрушении снизу

Таблица 1

Результаты испытаний при проломе льда снизу

Толщина льда, мм	Максимальное усилие, Н	Прогиб при максимальном усилии, мм	Параметр упругого основания \square , 1/м
35,5	3350	18	0,654
55,0	7080	29	0,466
30,0	2510	19	0,734
26,5	1430	14	0,806
34,0	2700	19	0,668
30,0	1950	12	0,734
42,5	6910	24	0,565
28,0	2200	17	0,773
35,0	3460	29	0,654
22,5	1280	28	0,911
33,0	3710	20	0,683
38,0	6470	26	0,615

Методика пересчета испытаний моделей объекта с систематически изменяемыми характеристиками базируется на теории моделирования деформирования и разрушения ледяного покрова с помощью пресноводной модели льда, изложенной в [1, 2, 3].

Планирование эксперимента в полном объеме затруднено. Это связано с неизбежной

случайностью толщины ледяного поля в момент проведения испытания. Грубый прогноз толщины намораживаемого льда базируется на времени и температуре воздуха. Но случайные метеорологические факторы (влажность, давление, динамика температуры, ветер) вносят свой вклад в фактическую толщину модели ледяного покрова, которая определяется сразу после разрушения ледяной пластины. Они же вместе с аппаратными случайными погрешностями приводят к некоторому разбросу измеряемых величин и наблюдаемых картин разрушения ледяных пластин. Фактически опыты не обладают высокой степенью повторяемости.

Соотношения геометрических параметров моделей имеют необходимый диапазон изменчивости, но конкретные соотношения параметров проектируемого объекта могут не совпадать с дискретным рядом моделей. Поэтому экспериментальные данные сначала подвергаются предварительной обработке. Строятся диаграммы в координатах сила – прогиб. Численные характеристики диаграмм аппроксимируются полуэмпирическими зависимостями, учитывающими существенные факторы процесса деформирования и разрушения льда. Например, проломное усилие описывается уравнением:

$$P = k' \cdot \sigma_{И} \cdot f\left(\frac{L}{b}, \alpha \cdot \sqrt{S}\right) \cdot \beta \cdot h^2, \quad (1)$$

где $k = k' \cdot \sigma_{И}$ – коэффициент удельной энергии разрушения льда при погружении вмерзшего энерго модуля, кПа; $f\left(\frac{L}{b}, \alpha \cdot \sqrt{S}\right) = \left(1 + 0,02 \cdot \frac{L/b}{\alpha \cdot \sqrt{S}}\right)$ – коэффициент, учитывающий влияние отношения длины нагрузки к ширине нагрузки; $\beta = (1 + 1,3 \cdot \alpha \cdot \sqrt{S})$ – коэффициент, учитывающий влияние площади нагрузки; $\sigma_{И}$ – средняя прочность льда на изгиб в условиях опыта, МПа; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{12\rho g(1-\mu^2)}{Eh^3}}$ – параметр упругого основания при изгибе ледяной пластины; E – модуль упругости льда; μ – коэффициент Пуассона для льда; ρ – плотность воды, т/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Затем рассчитываются кривые для моделей с параметрами вариантов натур. На рисунках приведены экспериментальные кривые для определения проломного усилия при нагружении снизу.

Далее в заданном диапазоне проектируемого объекта, заданных его характеристиках выполняется пересчет данных на натуру.

Пересчет толщины ледяного покрова и проломного усилия выполняется по формулам:

$$h_{н} = h_{м} \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}; \quad \lambda_E = \frac{E_{н}}{E_{м}}; \quad (2)$$

$$R_{н} = R_{м} \lambda^3. \quad (3)$$

При всплытии подводного судна в надводное положение в ледовых условиях теоретически возможны следующие варианты развития событий:

- 1) ледяной покров относительно тонкий и судно разрушает его за счет силы остаточной плавучести;
- 2) ледяной покров относительно толстый и судно не может разрушить его за счет силы остаточной плавучести;
- 3) сила остаточной плавучести не может быть использована полностью из-за ограничения прочности контактирующих конструкций или опасности потери остойчивости судна.

Существо проблемы состоит в нахождении границы между первым и вторым вариантами (проблема I), и между первым и третьим вариантами (проблема II) развития событий.

Ключевым вопросом является определение зависимости разрушающего лед усилия от толщины льда с учетом его физико-механических характеристик и формы прикладываемой нагрузки.

Проведенные (описанные ранее) экспериментальные исследования позволяют с использованием методики пересчета получить искомые зависимости для различных размеров и относительных размеров судна.

Проломное усилие при всплытии судна из-под льда в зависимости от толщины льда и солености воды приведено на рис. 2 и 3.

За поверхность контакта со льдом принята площадка с размерами в плане 25×27 м. На рис. 4 и 5 приведены графики проломного усилия в случае контакта с ограждением рубки размерами 4×13 м.

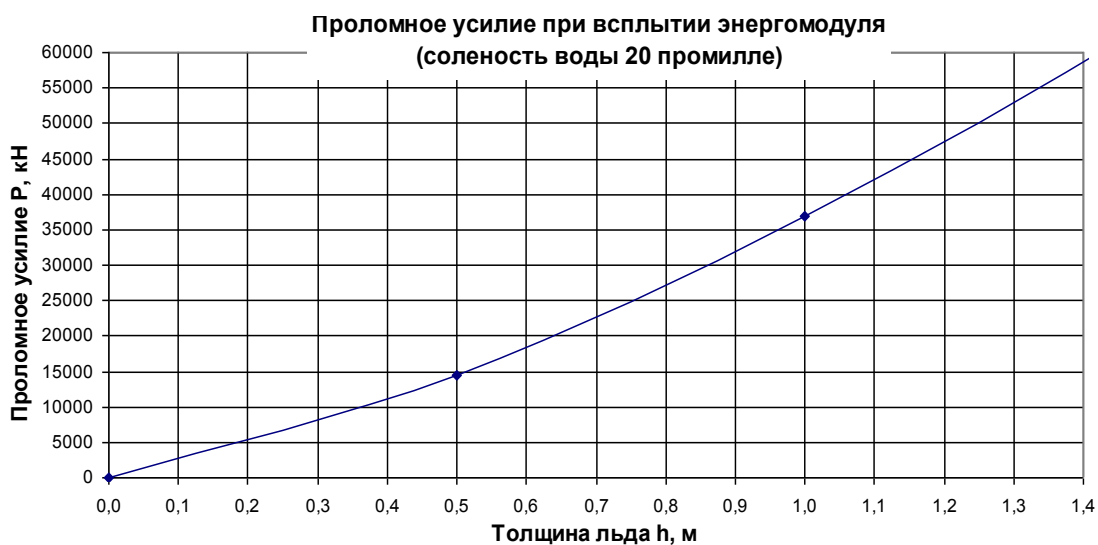


Рис. 2. Пролом площадкой размерами в плане 25×27 м

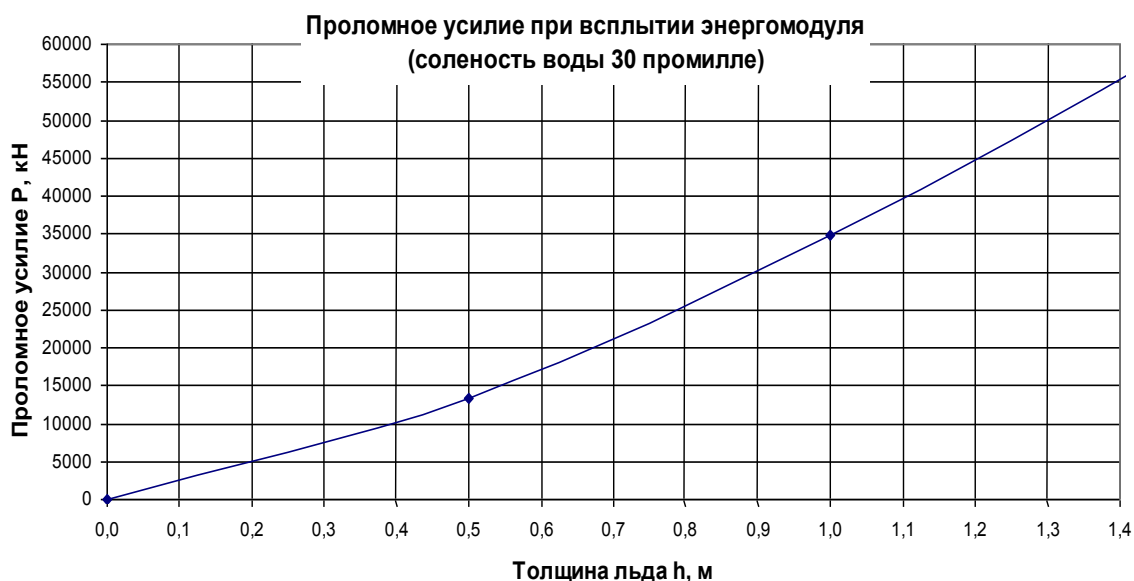


Рис. 3. Пролом площадкой размерами в плане 25×27 м

Расчеты максимальной силы прилепления без потери плавучести для ряда проектов подводных судов показали, что запас плавучести может быть использован приблизительно

на 30%. Это дает основание утверждать, что архитектура этих судов не рациональна с точки зрения всплытия в ледовых условиях.

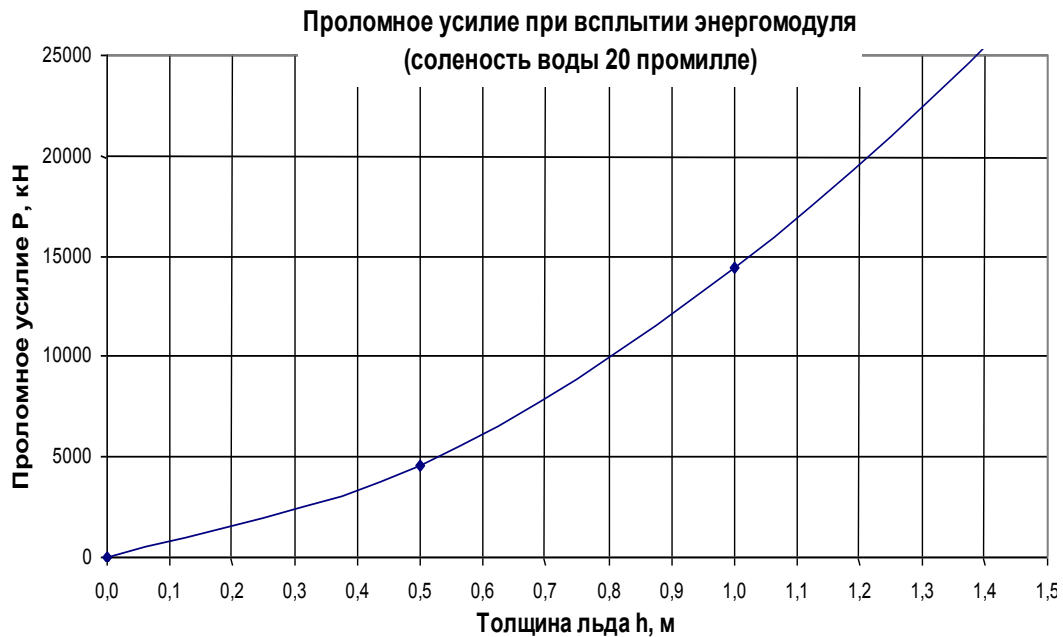


Рис. 4. Пролом ограждением рубки размерами 4×13 м

Для учета влияния ледовых условий на облик и конструктивные особенности подводного воспользуемся формулой расчета проломного усилия, полученной на основе анализа ледовых испытаний (1).

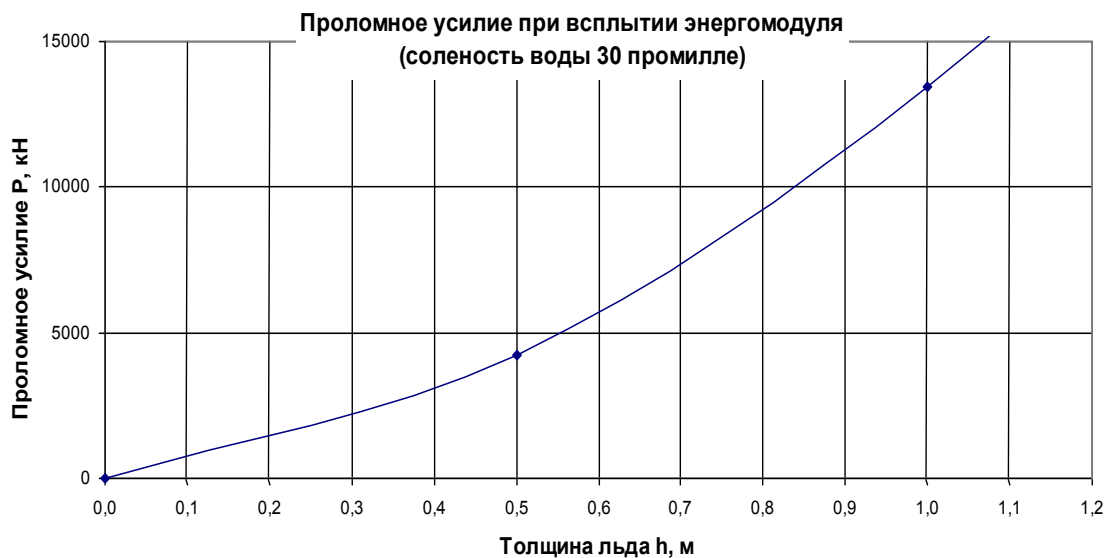


Рис. 5. Пролом ограждением рубки размерами 4×13 м

К снижению проломной нагрузки или к увеличению толщины проламываемого ледяного покрова при всплытии приводит уменьшение площади крыши ограждения рубки, а также уменьшение отношения её длины к ширине l/b .

Повысить разрушающее ледяной покров усилие при всплытии можно за счет продувания ограждения рубки. Для этого необходимо предусмотреть герметизацию крыши ограждения рубки при всплытии во льдах.

Необходимы конструктивные мероприятия по повышению разрушающего лед усилия при всплытии:

- понижение высоты ограждения рубки;
- уменьшение контактной площади крыши ограждения рубки;
- устройство специальных ледовых цистерн в верхней части корпуса, продуваемых при всплытии;
- увеличение подводной остойчивости судна.

Для некоторых рассмотренных проектов толщину проламываемого ледяного покрова, как показали расчеты, можно увеличить вдвое.

Эксплуатационная документация на подводное судно должна содержать инструкцию по эксплуатации в ледовых условиях. Необходимо контролировать соленость воды, температуру воздуха и толщину ледяного покрова.

Библиографический список

1. Антонов, В.С. Экспериментальные исследования возможности погружения подводного судна вмерзшего в лед / В.С. Антонов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2013. Вып. 4(101). С. 178–184.
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986 – 207 с.
3. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.

Дата поступления
в редакцию 29.11.2013

V.C. Antonov¹, E.M. Gramuzov², V.A. Zuev², A.G. Larin², U.M. Trapeznikov¹

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE POSSIBILITY OF ASCENT THE SUBMARINE IN A CONTINUOUS ICE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
СКВ Malahit¹

Purpose: The work is focused on the safety of the crews of submarines designed for operation in ice conditions of the Arctic seas. This article describes the experimental data and theoretical base to investigate possibility of ascent the submarine in a continuous ice.

Design/methodology/approach: The article provides a methodology for calculating the possibility of ascent the submarine under the ice. The method is based on the theory of modeling. In order to convert to a full-scale ship used experimental data.

Findings: Emergency surfacing of the submarine beneath the ice is possible when creating failure load effort by blowing main ballast tanks. failure load depends on the thickness of the ice, and the possibility of creating a reserve of stability of the vessel. Theoretically, the first part of the problem has not been adequately resolved and in this paper we investigate experimentally. The second part of the problem needs to be a rational choice of architectural solutions, which provides some guidance.

Research limitations/implications: The size of the article doesn't allow to present detailed results of end-use measurements.

Originality/value: First studies have been conducted and the results obtained for this type of vessel.

Key words: ice cover, ice conditions, margin of stability, failure load, experimental studies, submarine, architectural solutions.

УДК 629.125.8

А.А. Болотин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭКРАНОПЛАНА ПРИ РАЗГОНЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Одним из наиболее сложных режимов, с точки зрения управления экранопланом, является режим движения с момента отрыва от воды до выхода на крейсерский режим полета. Предлагается расчетная методика, позволяющая выбрать оптимальный режим управления экранопланом при разгоне.

Ключевые слова: экраноплан; уравнения движения; балансировка; продольное ускорение; оптимальное управление.

Создание пассажирских экранопланов является одной из перспективных задач развития водного транспорта. Сочетание высокого аэродинамического качества, амфибийности и мореходности должны позволить пассажирским экранопланам занять достойное место в транспортной системе нашей страны и других стран с развитыми водными путями. Одной из актуальных проблем при работе в этом направлении является обеспечение безопасного управления экранопланом.

Данная работа посвящена исследованию движения экраноплана «Акваглайд» (рис. 1). Это пятиместный прогулочный аппарат производства нижегородской фирмы «Амфибийные транспортные технологии», производящийся серийно, являющийся модернизацией серии экранопланов «Амфистар» [1].



Рис. 1. Экраноплан «Акваглайд»

Одной из особенностей данного экраноплана является система управления, исключая руль высоты и состоящая из закрылков и поворотных винтов, расположенных на пилонах в носовой части экраноплана. Схема расположения органов управления представлена на рис. 2. Изменение углов отклонения закрылков и пилонов производится одновременно при помощи одного рычага управления.

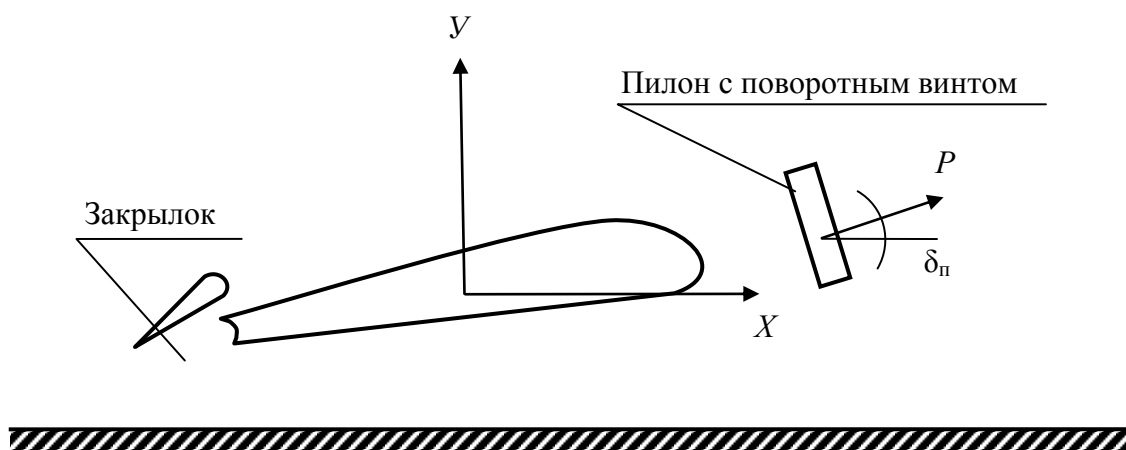


Рис. 2. Схема расположения органов управления

Такая система, с одной стороны, упрощает управление экранопланом, а с другой — требует четкости и отлаженности в работе. Назначение экраноплана подразумевает повышенные требования безопасности, которые обеспечиваются как аэродинамической компоновкой, так и отлаженной системой управления. Одним из путей совершенствования системы управления является математическое моделирование движения экраноплана на основе дифференциальных уравнений движения [2]. В данной работе в качестве исследуемого режима выбран режим разгона с момента отрыва от поверхности воды до выхода на крейсерский режим полета, как наиболее сложный в управлении. Особенностью этого режима движения являются существенное влияние на динамику струй от винтов и жесткие требования по изменению угла тангажа и высоты полета при разгоне аппарата. Отсутствие в компоновке руля высоты сводит задачу управления к координированной работе закрылков и поворотных винтов, расположенных на пилонах.

Таким образом, задачей является подбор значений угла отклонения закрылка и угла поворота пилонов, обеспечивающих заданные значения угла тангажа и высоты полета при движении экраноплана с ускорением. Целью данной работы является создание методики, позволяющей рассчитать балансирующие значения органов управления и скорости полета, а также продольное ускорение экраноплана, соответствующие заданному режиму полета и режиму работы двигателя. Полученные результаты расчета должны позволить выбрать оптимальный способ управления при переходе к крейсерской конфигурации полета.

Исходными данными для расчета являются: массовые и геометрические характеристики экраноплана, скоростная характеристика винта, режим работы двигателя, режим полета (угол тангажа, угол отклонения закрылка, высота полета) и аэродинамические характеристики, представляющие собой зависимости аэродинамических коэффициентов от угла тангажа, высоты полета и угла отклонения закрылка. Кроме того, известным является влияние струй от винта на аэродинамические характеристики, представленное в виде приращений аэродинамических коэффициентов в зависимости от коэффициента тяги и угла отклонения пилона. Приращения аэродинамических характеристик получены в результате испытаний модели экраноплана в аэродинамической трубе с моделированием работы двигателей. Из результатов испытаний [3] следует, что влияние струй от винта на аэродинамические характеристики можно представить в виде приращений аэродинамических коэффициентов C_x , C_y , m_z , в зависимости от угла отклонения пилона δ_n и коэффициента тяги C_p при заданных параметрах полета: угле атаки α , высоте полета h и угле отклонения закрылка δ_3 .

Коэффициент тяги винта определится выражением

$$C_p = 2P / (\rho V^2 S),$$

где $P = 2P_B(\epsilon, V)k$; P_B — тяга одного винта; ϵ — режим работы двигателя; V — скорость полета; k

– коэффициент, учитывающий влияние экраноплана на тягу винта; ρ – плотность воздуха; S – площадь крыла.

В качестве основы приняты уравнения установившегося движения экраноплана [4]. Учитывая представление аэродинамических характеристик, зависящих от струй от винта, а также то, что движение происходит с ускорением, уравнения движения экраноплана примут следующий вид:

$$P \cos(\delta_{\text{п}} + \vartheta) - \rho V^2 S / 2 (C_{x0} + \Delta C_x(C_P, \delta_{\text{п}})) = ma,$$

$$P \sin(\delta_{\text{п}} + \vartheta) + \rho V^2 S / 2 (C_{y0} + \Delta C_y(C_P, \delta_{\text{п}})) = mg,$$

$$PL_{\text{п}} \sin(\delta_{\text{п}}) + \rho V^2 SL / 2 (m_{z0} + \Delta m_z(C_P, \delta_{\text{п}})) = 0,$$

где ϑ – угол тангажа экраноплана; m – масса экраноплана; a – ускорение; $L_{\text{п}}$ – плечо вектора силы тяги; L – размах крыла; C_{x0} , C_{y0} , m_{z0} – аэродинамические характеристики экраноплана; $\Delta C_x(C_P, \delta_{\text{п}})$, $\Delta C_y(C_P, \delta_{\text{п}})$, $\Delta m_z(C_P, \delta_{\text{п}})$ – приращения аэродинамических характеристик.

Данную систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_P [\cos(\delta_{\text{п}} + \vartheta) - \Delta C_x(C_P, \delta_{\text{п}})] - C_{x0} &= n_x \sigma g, \\ -C_P [\sin(\delta_{\text{п}} + \vartheta) + \Delta C_y(C_P, \delta_{\text{п}})] + C_{y0} &= \sigma g, \\ C_P [\bar{L}_{\text{п}} \sin(\delta_{\text{п}}) + \Delta m_z(C_P, \delta_{\text{п}})] + m_{z0} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma = 2m / (\rho V^2 S)$, $\bar{L}_{\text{п}} = L_{\text{п}} / b_a$, $a = n_x g$; b_a – средняя аэродинамическая хорда крыла; n_x – продольная перегрузка.

В данной системе уравнений неизвестными величинами являются:

- скорость полета;
- коэффициент тяги силовой установки C_P ;
- угол отклонения вектора тяги (пилона) $\delta_{\text{п}}$;
- продольная перегрузка.

Два из неизвестных (C_P и $\delta_{\text{п}}$) входят в уравнения в неявном виде $\Delta C_x(C_P, \delta_{\text{п}})$, $\Delta C_y(C_P, \delta_{\text{п}})$, $\Delta m_z(C_P, \delta_{\text{п}})$. Решение может быть получено при задании одного из неизвестных, либо получением уравнения связи.

Необходимо отметить, что вектор тяги силовой установки может не совпадать с углом отклонения пилона (элемента управления вектором тяги). Кроме того, существуют два варианта балансировки в полете:

- полная балансировка по силам и моментам;
- балансировка только по вертикальным силам и моментам.

В первом случае задается $n_x = 0$. Во втором случае, как правило, задается режим работы двигателя, т.е. уравнение связи. $P_{\text{потр}} = P_{\text{расп}}(\varepsilon, V)$ при заданном значении ε .

На крейсерском режиме движения имеет место полная балансировка. Балансировочные значения неизвестных определяются методом последовательных приближений по C_P при заданных значениях $\delta_{\text{п}}$. Полученное значение C_P должно удовлетворять уравнению продольных сил и уравнению моментов. Из уравнения вертикальных сил определяется скорость полета и потребная тяга.

Для балансировки на переходных режимах полета ($n_x \neq 0$) из уравнения моментов методом последовательных приближений определяется C_P при заданном значении $\delta_{\text{п}}$, по нему из уравнения вертикальных сил определяется скорость полета и потребная тяга силовой установки, которая сравнивается с располагаемой при заданном режиме работы. Методом последовательных приближений определяются $C_P, V, \delta_{\text{п}}$, при которых $P_{\text{потр}} = P_{\text{расп}}$. Для этого случая и определяется n_x . В общем случае при некоторых $\delta_{\text{п}}$ решения может не быть, или оно находится вне области определения.

В результате расчета при заданных значениях угла тангажа, высоты полета, угла отклонения закрылка и режима работы двигателя получаем балансирующее значение ускорения и значения тяги двигателя, скорости полета и угла отклонения пилона.

Результаты расчета необходимо представить в виде графических зависимостей. Для этого выполняются расчеты в широком диапазоне углов тангажа, высот полета и углов отклонения закрылков при заданном режиме работы двигателя. Для представления результатов фиксируется один из параметров полета: либо угол тангажа, либо высота. Далее строятся графики, представляющие собой зависимости высоты полета от скорости при постоянных значениях угла отклонения закрылка, угла отклонения пилона, ускорения, либо графики ϑ от V для тех же зависимостей.

Такое представление результатов позволяет подобрать оптимальное сочетание углов отклонения органов управления, соответствующее заданным условиям. Анализ полученных кривых дает возможность оценить управляемость и устойчивость экраноплана при движении с ускорением. Данная методика позволяет также подобрать и алгоритм торможения, т.е. выбрать схему управления экранопланом при переходе от крейсерского режима полета до момента касания воды. Методику также несложно распространить на экранопланы с аэродинамическими схемами, отличными от схемы экраноплана «Акваглайд». Математическая модель, предложенная в данной работе, позволяет расширить расчетные методы исследования устойчивости экранопланов и моделирования переходных процессов при произвольных возмущениях.

Библиографический список

1. Сеницын, Д.Н. Первый гражданский экраноплан «Амфистар» / Д.Н. Сеницын, А.И. Маскалик. – СПб.: Судостроение, 1999. – 112 с.
2. Болотин, А.А. Особенности математической модели ветро-волновых возмущений при исследовании мореходности экранопланов // Современные проблемы кораблестроения: сб. науч. тр. / НГТУ. – Н. Новгород, 2003.
3. Исследование аэродинамических характеристик модели экраноплана «Акваглайд». Технический отчет № 43197, ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. М., 2005.
4. Экранопланы. Особенности теории и проектирования / А.И. Маскалик [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2000. – 320 с.

Дата поступления
в редакцию 29.11.2013

A.A. Bolotin

MATHEMATICAL MODELING OF WIG VEHICLE MOTION DURING ITS TAKE-OFF RUN

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

One of the most complicated motion modes in WIG vehicle driving is the motion mode during the time after its take-off and before running at cruise. As a study object the WIG vehicle “Aquaglide” was chosen. “Aquaglide” is a five-seat ferry shuttle made by Nizhny Novgorod’s firm “Amphibious transport technologies”.

The objective is to develop a methodology of the flap and the rotary air propellers placed on the pylons coordinated control simulation. The solution is based on WIG vehicle motion dynamics equations. The considered problem reduces to the problem of WIG vehicle balancing calculation considering longitudinal overload. The unknown quantities are the values of engine thrust, airspeed, angle of pylon deviation and angle of flap deviation. Solution is found by method of successive approximations. Herewith we fix the flap deviation angle.

The results of the calculation must be submitted in the form of graphs. For this purpose, calculations are performed in a wide range of pitch angles, altitudes and the flap deviation angle for a given engine operation mode. This results representation allows us to find the optimal combination of the deviation angles of operating controls that meet predefined criteria.

Key words. WIG vehicle; motion equation; balancing; **direct-axis** acceleration; optimal driving.

УДК 621.43

Л.А. Захаров, В.Л. Химич, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов, А.В. Дегтярев

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ
АТМОСФЕРНЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются и анализируются характеристики рядных четырехцилиндровых двигателей внутреннего сгорания первого, второго, третьего, четвертого и пятого поколений и тенденции развития их инженерных решений, обеспечивающих выполнение современных норм отечественных и зарубежных стандартов по энергетическим, экономическим и экологическим показателям.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, энергия рабочего тела, энергопреобразование, индикаторная диаграмма, рабочий цикл.

Рабочий цикл в рабочей камере цилиндра ПДВС протекает по-разному. Переменными являются термодинамические, индикаторные, эффективные и другие показатели ПДВС – его мощность, крутящий момент, часовой и удельный расходы топлива. Поэтому для грамотного выбора оптимальных режимов очень важно представлять, как изменяются эффективные показатели ПДВС в различных условиях. Что, например, определяет максимальную мощность ПДВС? Как и почему изменяются мощность и крутящий момент при различных скоростных режимах работы транспортной техники? Как правильно подобрать ПДВС для транспортного средства? Что определяет топливную экономичность ПДВС и путевой расход топлива? При этом возможна работа ПДВС при фиксированном положении органа (полное открытие дроссельной заслонки), регулирующего подачу топлива, но с переменной частотой вращения коленчатого вала из-за изменяющейся нагрузки (переменный профиль дороги). В этом случае изменяется скоростной режим работы ПДВС, а совокупности таких режимов называют *скоростными*.

Скоростные характеристики ПДВС определяют путем испытаний, осуществляемых на специализированных стендах, позволяющих воспроизводить все поле скоростных режимов работы ПДВС и оборудованных комплексом необходимой контрольно-измерительной аппаратуры. Типовые методы испытаний ПДВС, объем и условия их проведения регламентированы государственными стандартами (ГОСТ 14846-91 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний»). При однофакторном эксперименте независимые параметры (факторы) искусственно сохраняются постоянными на заданном уровне, и только один из них, влияние которого исследуется в данном эксперименте, подвергается изменению в определенных пределах. Однофакторный эксперимент сводится к определению зависимостей их эффективных показателей: мощности, крутящего момента, часового и удельного расхода топлива от одного из режимных факторов – частоты вращения коленчатого вала – *скоростные характеристики*.

ГОСТ 14846-91 устанавливает понятия «*мощность нетто*» и «*мощность брутто*».

Под мощностью нетто понимается мощность, снятая с фланца коленчатого вала ПДВС, изготовленного, отрегулированного и обкатанного в соответствии с техническими условиями на ПДВС, при укомплектованности ПДВС оборудованием в составе транспортного средства – радиатором, вентилятором подсистемы охлаждения, воздухоочистителем, нейтрализатором трехкомпонентным, резонатором, глушителем шума выпуска, выпускным трубопроводом. Таким образом, мощность нетто характеризует реальную энергоотдачу ПДВС в объективных условиях – учитывает все принципиальные устранимые потери энергии (15–17%).

Скоростные характеристики бензинового ПДВС

Быстроходный ПДВС может работать при различной частоте вращения коленчатого вала от минимальной до максимальной.

Максимальное допустимое число оборотов ограничивается: условиями качественного протекания рабочего цикла, инерционными усилиями в деталях КШМ, снижением коэффициента наполнения, термическими напряжениями в деталях КШМ.

Минимальное число оборотов ПДВС определяется условиями устойчивой работы ПДВС. На каждом скоростном режиме крутящий момент и мощность ПДВС изменяются от нуля до максимального значения, ограниченного одним из параметров, указанных ранее.

Графическая зависимость параметров ПДВС от числа оборотов довольно полно характеризуют работу ПДВС.

Мощность и крутящий момент ПДВС при данном числе оборотов устанавливаются путем настройки органа управления – *дрессельной заслонки*.

Если ПДВС используется в качестве силовой установки транспортной техники, то число оборотов пропорционально скорости движения. От скорости машины зависит сопротивление движению, а значит, и мощность ПДВС.

В соответствии с ГОСТ 14846-91 в число обязательных параметров, изображенных на скоростной характеристике, в функции от числа оборотов входят: максимальная мощность; максимальный крутящий момент; удельный расход топлива.

На графиках (рис. 3–9 и в табл. 1–5) приведены скоростные характеристики ПДВС от первого до пятого поколений на полной подаче топлива.

Графики и таблицы скоростных характеристик позволяют определить: максимальную мощность и крутящий момент; минимальную мощность; мощность и крутящий момент при любом числе оборотов на полной подаче топлива; часовой расход воздуха и топлива при данном режиме; выбрать наиболее экономичный режим; среднее эффективное давление; эффективный КПД; определить удельные литровую и цикловую мощности при любом числе оборотов на полной подаче топлива; сравнить ПДВС; подобрать потребитель мощности к ПДВС и приводной ПДВС к потребителю по его характеристике; определить режимы работы потребителя мощности и др.

В эксплуатационных условиях изменение скоростного режима работы ПДВС встречается так же часто, как и изменение нагрузки.

Число оборотов оказывает наиболее сильное влияние на параметры рабочего цикла и на основные показатели работы ПДВС. Повышение числа оборотов является одним из наиболее эффективных методов форсирования мощности ПДВС.

Вследствие этого знания закономерностей и причин, обуславливающих изменение основных параметров рабочего цикла и показателей работы ПДВС в функции числа оборотов, дает возможность определить наиболее эффективные способы улучшения его работы.

Скоростная характеристика может быть получена при следующих условиях: независимой переменной в функции, которой рассматривается изменение основных показателей работы ПДВС, является число оборотов; константой характеристики служит положение органов управления подачей воздуха и топлива.

Показатели работы ПДВС, которые чаще всего исследуются и являются зависимыми переменными скоростной характеристики, следующие: крутящий момент, эффективная мощность, часовой и удельный расходы топлива. По скоростной характеристике ГОСТ 14846-91 установлены характерные числа оборотов и их обозначения для ПДВС:

- максимальное число оборотов n_N – число оборотов коленчатого вала, соответствующее максимальной эффективной мощности по скоростной характеристике;

- число оборотов коленчатого вала, соответствующее максимальному значению крутящего момента ПДВС по скоростной характеристике при полном открытии дроссельной заслонки n_M ;
- число оборотов коленчатого вала, соответствующее минимальному удельному расходу топлива по скоростной характеристике при полном открытии дроссельной заслонки n_{ge} ;
- число оборотов коленчатого вала, соответствующее удельному расходу топлива на максимальной мощности по скоростной характеристике при полном открытии дроссельной заслонки $n_{N_{ge}}$.

Анализ графиков (рис. 3–9) и табл. 1–5 показывает, что показатели рабочего цикла и основные параметры ПДВС постоянно и планомерно повышались от ПДВС первого поколения до ПДВС пятого поколения. Однако представляет значительный интерес тенденция развития ПДВС, которые рассмотрены далее.

Бензиновые ПДВС работают по термодинамическому циклу Отто с постоянной массой рабочего тела, с подводом энергии к рабочему телу и отводом от него энергии, осуществляется при постоянном объеме.

Таблица 1

Двигатель М-20 – первое поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	3800
Мощность N_e , кВт	11,31	25,13	35,50	35,14
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	108,00	120,00	113,00	88,30
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	286,5	255	262	294
Часовой расход топлива G_t , кг/ч	3,24	6,41	9,30	10,33
Эффективный КПД η_e	0,285	0,321	0,312	0,278
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,476	0,476	0,466	0,414
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	4,62	10,27	14,51	14,36
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	2,31	5,14	7,26	7,18

Таблица 2

Двигатель ЗМЗ-21А – второе поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000
Мощность N_e , кВт	15,9	34,9	48,2	51,5
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	151,5	166,7	153,4	123
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	340	321,5	338,5	377
Часовой расход топлива G_t , кг/ч	5,4	11,22	16,31	19,42
Эффективный КПД η_e	0,241	0,254	0,242	0,217
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,793	0,834	0,818	0,738
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	6,49	14,27	19,69	21,05
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	3,24	7,14	9,85	10,53

Таблица 3

Двигатель ЗМЗ-24-01 – третье поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000	4500
Мощность N_e , кВт	15,5	35,4	51	61,5	62,5
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	147,9	169	162,6	146,8	132,5
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	377	362,9	319,6	356,1	400,6
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	5,84	12,77	15,75	21,89	25,04
Эффективный КПД η_e	0,217	0,225	0,256	0,230	0,204
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
Коэффициент наполнения, η_n	0,858	0,949	0,790	0,833	0,846
Литровая мощность N_l , кВт/л	6,33	14,39	20,14	25,14	25,55
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	3,17	7,19	10,07	12,57	12,77

Таблица 4

Двигатель ЗМЗ-21Д – четвертое поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000
Мощность N_e , кВт	16,4	37	52,5	58,8
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	156,3	176,6	167	140,4
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	378,3	321,5	315,2	346,2
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	6,2	11,89	16,54	20,36
Эффективный КПД η_e	0,216	0,254	0,259	0,236
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,910	0,884	0,829	0,774
Литровая мощность N_l , кВт/л	6,69	15,12	21,45	24,04
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	3,34	7,56	10,72	12,02

Таблица 5

Двигатель ЗМЗ-4061.10 – пятое поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000	5000	5200
Мощность N_e , кВт	14,07	34,14	56,10	74,22	80,63	80,59
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	134,40	163,00	178,60	177,20	154,00	148,00
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	296,3	276,3	275	299	308,7	303,9
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	4,17	9,43	15,43	22,19	24,89	24,49
Эффективный КПД η_e	0,276	0,296	0,297	0,274	0,265	0,269
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,613	0,701	0,774	0,844	0,757	0,717
Литровая мощность N_l , кВт/л	5,75	13,95	22,93	30,34	32,96	32,94
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	2,88	6,98	11,47	15,17	16,48	16,47

Максимальное количество внутренней энергии в рабочей камере цилиндра термодинамического ПДВС можно получить по формуле развернутой термодинамической мощности:

$$N_t = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Качество энергопреобразования в термодинамическом цикле оценивается термодинамическим КПД, равным отношению полезной работы $L_0 = Q_{1v} - Q_{2v}$ к подведенной энергии к рабочему телу Q_1 :

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_1} = \frac{Q_{1v} - Q_{2v}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_{2v}}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\delta^{k-1}}. \quad (2)$$

Таким образом, КПД цикла Отто, выполняемого с идеальным рабочим телом ($k=\text{const}$), зависит только от соотношения геометрических объемов, в пределах которых осуществляется термомодеформирование рабочего тела, численное равно степени сжатия и степени расширения.

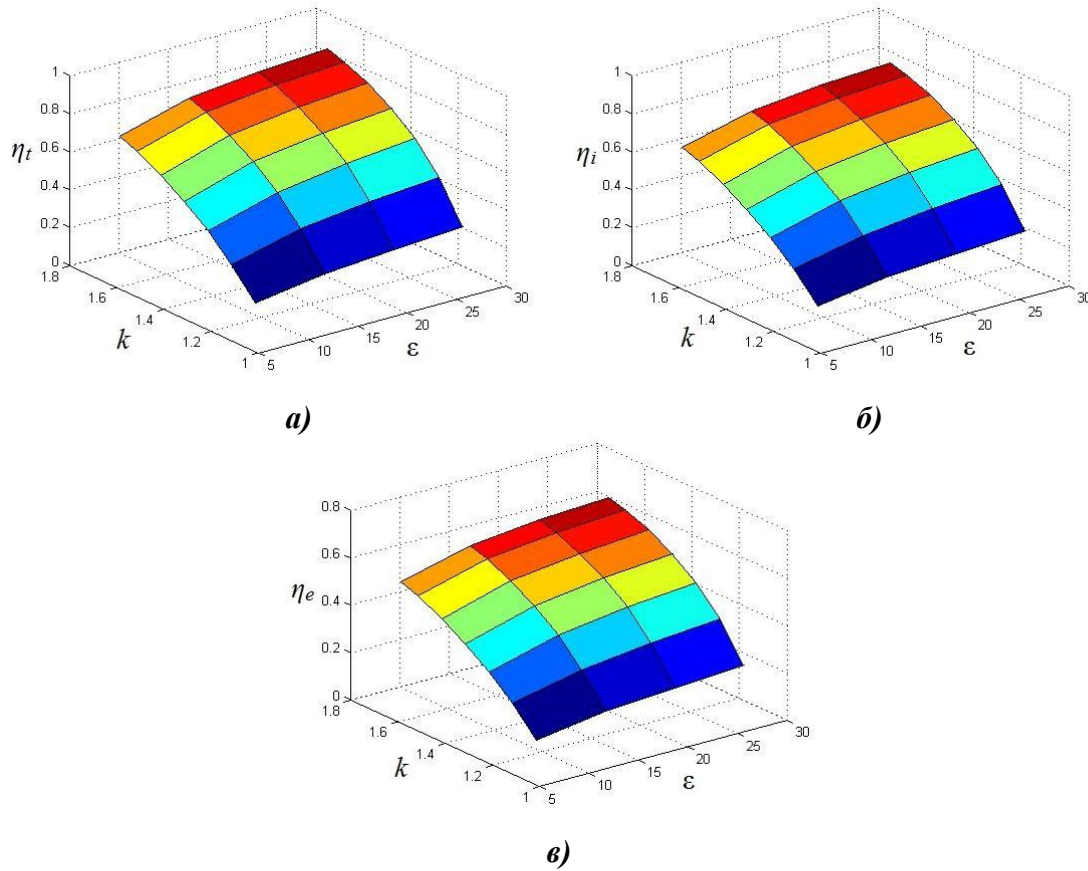


Рис. 1. Поверхности КПД:
 а – термодинамического; б – индикаторного; в – эффективного

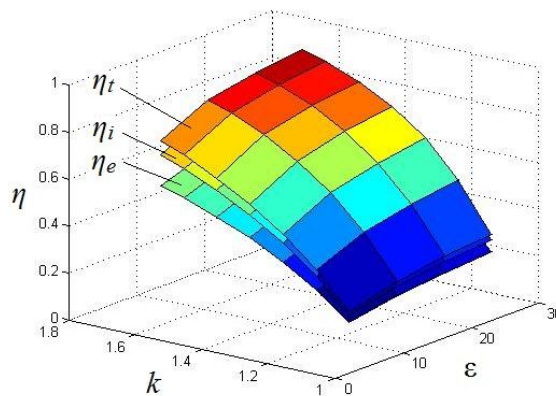


Рис. 2. Графики изменения КПД (термодинамического, индикаторного, эффективного) от степени сжатия ε и показателя адиабаты k цикла Отто поршневого ДВС

Физический смысл положительного влияния степени сжатия на КПД можно оценить синтезом, сравнивая изменение значений работы сжатия и расширения. Как следует из термодинамических зависимостей, удельная работа расширения 1 (одного) кг рабочего тела в адиабатическом процессе z - b может быть записана в виде:

$$l_p = \frac{RT_z}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (3)$$

где $R = \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – газовая постоянная; k – показатель адиабаты; $T_z = K$ – температура в точке z .

Одной из тенденций развития ПДВС является работа расширения при данной температуре T_z , определяемая степенью увеличения объема рабочей камеры цилиндра, численно равной степени сжатия (формула (3)). Чем больше степень сжатия, тем значительнее степень расширения и тем большая работа может быть совершена рабочим телом.

Однако вместе с увеличением положительной работы расширения возрастает работа, затрачиваемая на сжатие рабочего тела. Для удобства сравнения эту работу $l_{сж}$ можно представить в виде работы расширения рабочего тела из точки c , т.е.

$$l_{сж} = \frac{RT_c}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (4)$$

Разность между l_p и $l_{сж}$ представляет собой полезную работу термодинамического цикла:

$$l_t = l_p - l_{сж} = \frac{RT_c}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) \left(\frac{T_z}{T_c} - 1 \right), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (5)$$

Обозначим отношение температуры $\frac{T_z}{T_c} = \lambda$, что эквивалентно степени повышения давления при изохорическом подводе энергии. Тогда, поскольку первая часть формулы (5) представляет собой работу сжатия рабочего тела, можно записать:

$$l_t = l_{сж} (\lambda - 1). \quad (6)$$

Отсюда полезная работа цикла с ростом степени сжатия увеличивается в $(\lambda - 1)$ раз по сравнению с $l_{сж}$, так как в этом случае работа расширения растет быстрее работы сжатия.

Таким образом, рассмотренные термодинамические принципы (тенденции) позволяют сделать вывод о том, что абсолютный эффект энергопреобразования в ПДВС обусловлен энергией, подводимой в цикле, являющейся *энергетическим потенциалом* преобразования. Однако при осуществлении цикла принципиально неустранимым является и отвод энергии Q_{2v} , т.е. потери энергии, обуславливающая КПД цикла. Эта потеря энергии имеет меньшее значение, а КПД – наибольшее при росте степени сжатия. Принципиальное значение также имеет закон подвода теплоты. Наилучшим с позиции уменьшения принципиально неустранимых тепловых потерь является подвод энергии при постоянном объеме рабочей камеры цилиндра.

В ПДВС осуществляется преобразование энергии, выделяющейся в результате сгорания энергоносителя, в работу, совершаемую расширяющимися от нагревания продуктами сгорания (рабочим телом). Результат этого преобразования зависит, прежде всего, от энергии экзотермической реакции окисления введенной в рабочую камеру цилиндра порции окислителя и энергоносителя. Назовем ее цикловой энергией ($Q_{ц}$, Дж). Цикловая энергия является тем энергетическим потенциалом, который может быть частично преобразован в работу расширения рабочего тела. Чем больше этот потенциал, тем большую работу можно получить в результате энергопреобразования. Полезная доля цикловой энергии $Q_{ц}$ оценивается специализированным коэффициентом (η_i), называемым индикаторным коэффициентом полезного действия (КПД).

Тогда полезная индикаторная работа цикла (l_i) может быть выражена зависимостью:

$$l_i = Q_{ц} \cdot \eta_i, \text{ Дж.} \quad (7)$$

Цикловая энергия определяется количеством окислителя и энергоносителя, поступающих в рабочую камеру, полный объем цилиндра ПДВС, за цикл – цикловой подачей энергоносителя ($g_{ц}$), и теплотой сгорания топлива (Q_H), выделяющейся при окислении единицы его массы (кг), т.е.:

$$Q_{ц} = g_{ц} \cdot Q_H \cdot \eta_i, \text{ Дж.} \quad (8)$$

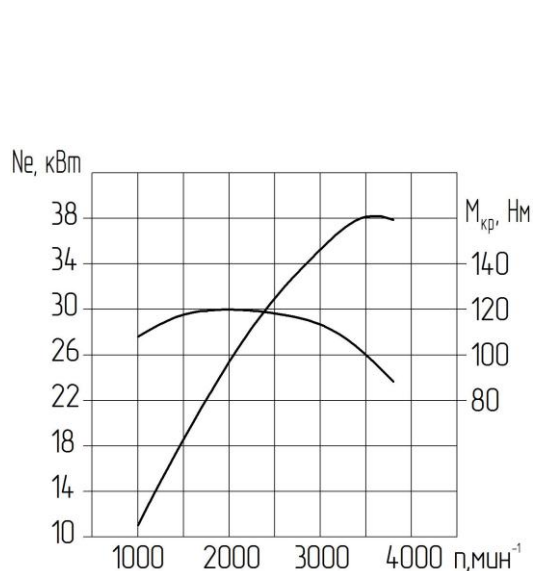


Рис. 3. Внешние характеристики двигателя М-20

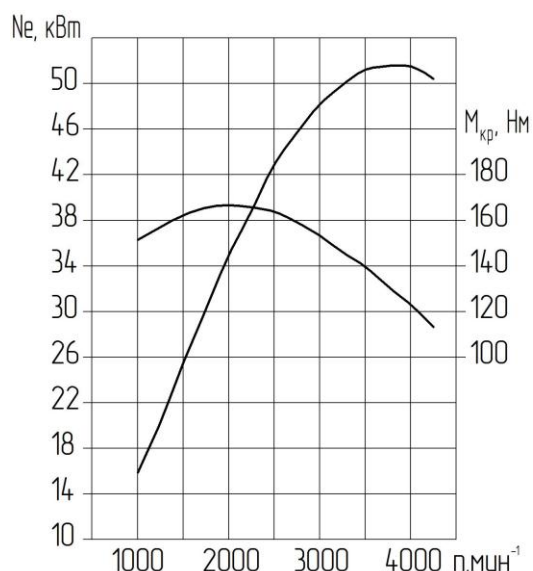


Рис. 4. Внешние характеристики двигателя ЗМЗ-21А

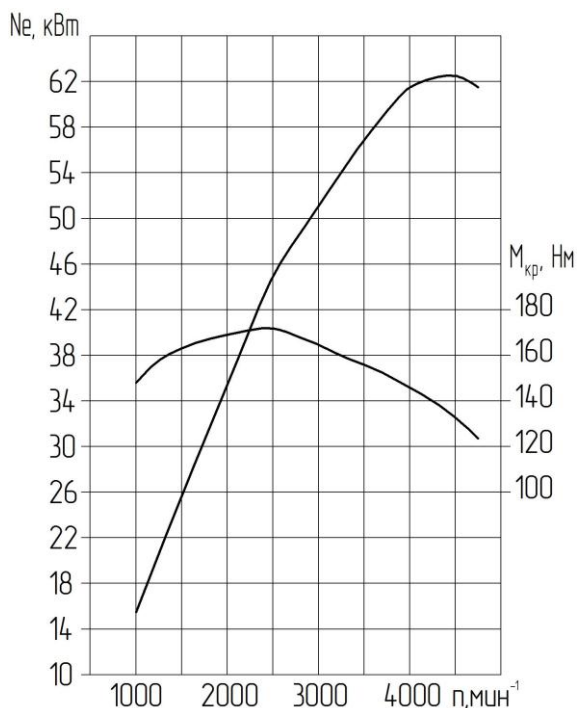


Рис. 5. Внешние характеристики двигателя ЗМЗ-24-01

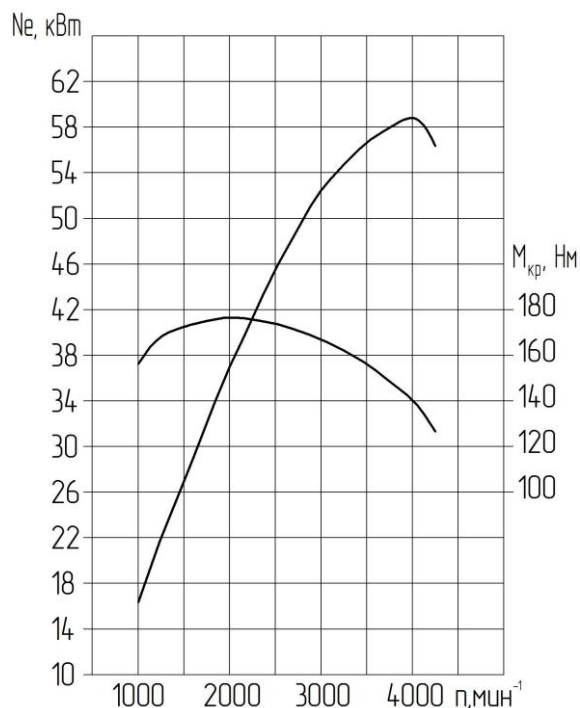


Рис. 6. Внешние характеристики двигателя ЗМЗ-21Д

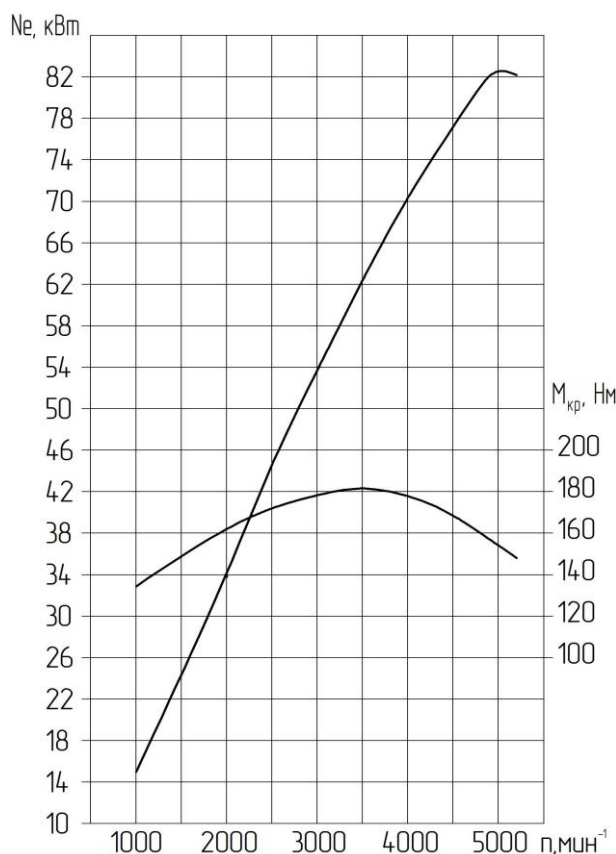


Рис. 7. Внешние характеристики двигателя ЗМЗ-4061.10

В свою очередь, цикловая подача топлива соотнесена с воздушным цикловым зарядом ($M_{в.ц}$). Качество смесеобразования оценивается коэффициентом избытка воздуха (α). Цикловая подача топлива может быть выражена:

$$g_{ц} = \frac{M_{в.ц}}{\alpha \cdot l_0}, \text{ кг/цикл}, \quad (9)$$

а цикловая энергия:

$$Q_{ц} = \frac{M_{в.ц} \cdot Q_H}{\alpha \cdot l_0}, \text{ Дж/цикл}. \quad (10)$$

Анализ последнего выражения показывает, что коэффициент избытка воздуха (α) по своему физическому смыслу отражает степень насыщения воздушного заряда топливом. При $\alpha=1$ получается нормальная теоретическая смесь для полного сгорания топлива (стехиометрическая).

Таким образом, цикловая энергия, как энергетический потенциал, который может быть использован для получения полезной работы, зависит только от воздушного циклового заряда ($M_{в.ц}$) и степени насыщения его энергоносителем (α). Качество процесса наполнения рабочей камеры цилиндра оценивается коэффициентом наполнения (η_n), тогда:

- воздушный цикловой заряд составит:

$$M_{в.ц} = V_S \cdot \eta_n \cdot \rho_v, \text{ кг/цикл}; \quad (11)$$

- индикаторная работа составит:

$$l_i = \frac{Q_H}{l_0} \cdot \frac{V_S \cdot \eta_n \cdot \rho_v}{\alpha} \cdot \eta_i, \text{ Дж/кг}. \quad (12)$$

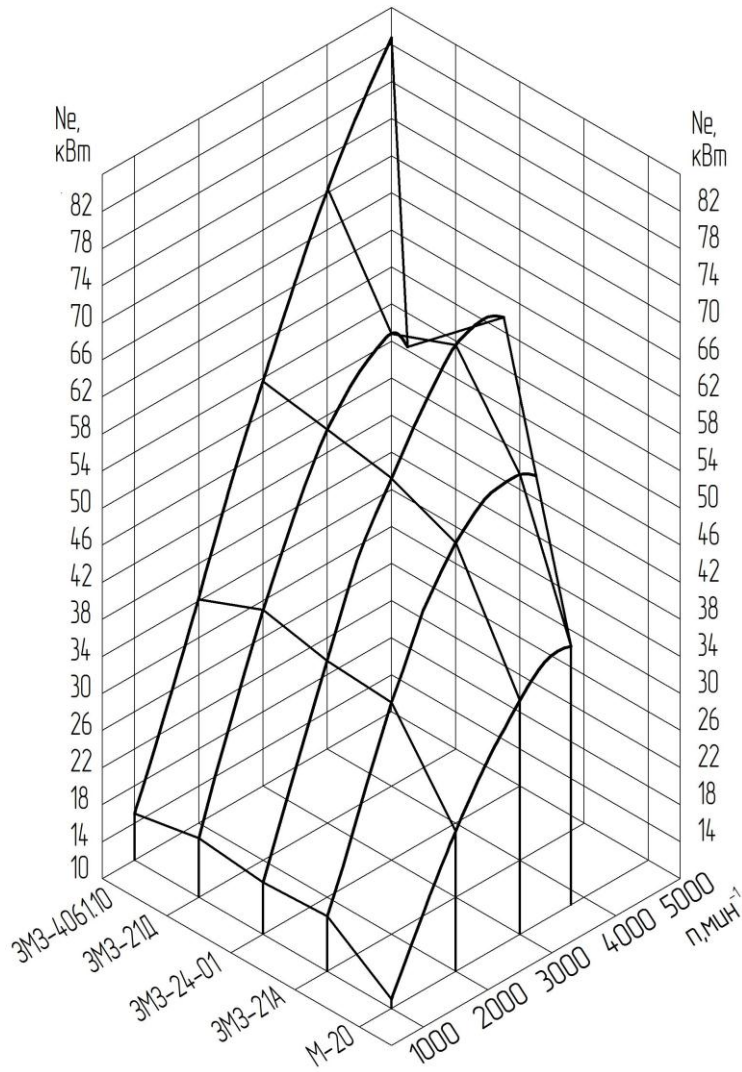


Рис. 8. График изменения мощности для пяти поколений двигателей

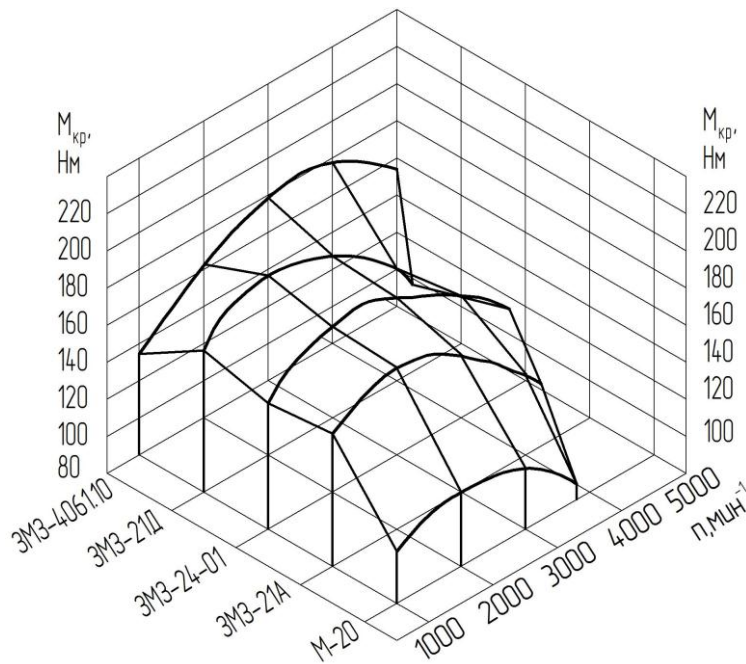


Рис. 9. График изменения крутящего момента для пяти поколений двигателей

Для оценки эффективности энергопреобразования полученную работу представим в виде удельной величины, приходящейся на единицу рабочего объема ПДВС $\left(\frac{H \cdot M}{M^3} = \frac{H}{M^2}\right)$, который называют средним индикаторным давлением:

$$p_i = \frac{Q_n}{l_0} \cdot \frac{\rho_e \cdot \eta_n}{\alpha} \cdot \eta_i, \text{ Па.} \quad (13)$$

Тяговая характеристика ПДВС обусловлена силовым фактором – крутящим моментом, равным:

$$M_{\text{ко}} = 9550 \frac{N_e}{n}, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (14)$$

Для оценки степени использования рабочего объема ПДВС используют удельный показатель – литровую мощность, равную:

$$N_{\text{л}} = \frac{N_{eH}}{i \cdot V_s}, \text{ Вт/л.} \quad (15)$$

Анализ и синтез проведенных исследований показывает:

- Рядные четырехцилиндровые поршневые двигатели внутреннего сгорания Горьковского автомобильного и Заволжского моторного заводов, работающие на топливе с низким октановыми числами А-66, А-72, А-76, имели высокие энергетические и экономические показатели и отвечали требованиям государственным и отраслевым отечественным и европейским стандартам.
- Основные технические характеристики ПДВС от первого до пятого поколений постоянно и планомерно совершенствовались и отвечали требованиям транспортной стационарной техники.

К тенденциям развития атмосферных рядных четырехцилиндровых ПДВС от первого до пятого поколений, выпускаемых Горьковским автомобильным и Заволжским моторным заводами, по инженерным решениям следует отметить:

- в ПДВС освоен термодинамический цикл «Отто» с подводом и отводом энергии к рабочему телу при постоянном объеме с высокими термодинамическими показателями;
- отработаны до уровня современных ПДВС, кинематическая и динамическая схемы работы кривошипно-шатунного механизма, газораспределительного механизма и механизма уравнивания сил инерции второго порядка, освоены в реальных конструкциях современных ПДВС, выпускаемых Заволжским моторным заводом;
- выполнены инженерные решения органов впуска и выпуска подсистемы газообмена и продолжительность газообмена при их постоянном и планомерном совершенствовании получили признание на ПДВС пятого поколения;
- ПДВС от первого до пятого поколения имеют удельные энергетические, экономические, экологические и эксплуатационные показатели, отвечающие требованиям государственных и отраслевых отечественных и европейских стандартов.

Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Метод оценки термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по циклу Отто на ранней стадии проектирования / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Журнал ААИ. 2011. №2(67). С. 42–47.
2. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41–43.
3. **Захаров, Л.А.** Современный поршневой ДВС с перспективными энергетическими, экономическим и экологическими показателями, получаемыми за счет повышения внутренней энергии рабочего тела / Л.А. Захаров [и др.] // Журнал ААИ. 2013. №2(79). С. 14–20.

4. **Захаров, Л.А.** Совершенствование термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по гибриднему циклу/ Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 1 (86). С. 174–184.
5. Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2010. – 33 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.12.2013*

L.A. Zakharov, V.L. Khimich, I.L. Zakharov, A.N. Tarasov, A.V. Degtyarev

PERFORMANCE ANALYSIS AND TRENDS OF ATMOSPHERIC INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Discusses and analyzes the characteristics of in-line four-cylinder internal combustion engine of the first, second, third, fourth and fifth generations and trends of their engineering solutions that ensure compliance with modern standards of domestic and international standards on energy, economic and environmental indicators.

Conclusions: The analysis of the characteristics allows us to conclude that the duty cycle and the basic parameters of the internal combustion engine is constantly and steadily increased from the first to the fifth generation. The following trends in the development of ICE was identified: Otto thermodynamic cycle with inlet and outlet energy to the working fluid at constant volume with high thermodynamic parameters is mastered; kinematic and dynamic schemes of the crank mechanism, timing mechanism and balancing of inertia forces of second order are worked. engineering decisions of the intake and exhaust subsystem gas exchange and duration of gas exchange when used consistently and systematically improving gained recognition for reciprocating internal combustion engine of the fifth generation; energy, economic, environmental and operational performance of the engines from the first to the fifth generation meet the requirements of state and industry standards.

Key words: internal combustion engines, the energy of the working fluid energy conversion indicator diagram, the duty cycle.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3

А. Е. Наумец, Р.С. Таганов, Г. М. Мирясов, В. Г. Титов

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

ОАО «Газпромавтоматизация»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью работы является проектирование схемы управления электромагнитного подшипника для газодувки мощностью 16 МВт с различными вариантами регуляторов: ПИ-регулятором, релейный регулятор, релейный регулятор, работающим в скользящем режиме. Для расчета регулятора использовали метод передаточных функций. Показано, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник приводных двигателей, релейный регулятор, работающей в скользящем режиме, пропорционально-интегральный регулятор.

Основными потребителями энергоресурсов в газовой промышленности являются газотранспортные предприятия (табл. 1). Это связано с главной особенностью магистрального транспорта газа – при прохождении газа по трубопроводу возникает трение потока о стенку трубы, что вызывает потерю давления. Например, при расходе газа 90 млн м³/сут по трубе \varnothing 1420 мм давление убывает с 7,6 до 5,3 МПа на участке $L = 110$ км. Поэтому транспортировать природный газ в достаточном количестве и на большие расстояния только за счет естественного пластового давления невозможно.

Таблица 1

Подотрасли	Потенциал энергозатрат
Транспорт газа	69,7 %
Распределение газа	7,5 %
Электротеплоснабжение	7,5 %
Добыча газа, конденсата, нефти	7,0 %
Переработка газа	4,6 %
Подземное хранение газа	3,5 %
Бурение и капремонт скважин	0,2 %

Повышение давления газа на компрессорных станциях (КС) осуществляется в одну, две и три ступени с помощью поршневых или центробежных нагнетателей, приводом которых могут служить электродвигатели, поршневые двигатели внутреннего сгорания и газотурбинные установки различных типов.

Оптимальный режим эксплуатации магистрального газопровода заключается в максимальном использовании его пропускной способности (газоподачи) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку. В значительной степе-

ни этот режим определяется работой компрессорных станций, устанавливаемых по трассе газопровода через каждые 100-150 км. Длина линейных участков между компрессорными станциями рассчитывается исходя из величины падения давления газа на одном участке не более чем на 1.6-2.5 МПа, а также из привязки станции к населенным пунктам и источникам электроэнергии. Оптимальная работа компрессорных станций зависит от типа и числа газоперекачивающих агрегатов, установленных на станции, их энергетических показателей и технологических возможностей.

Режим работы современного газопровода, несмотря на наличие станций подземных хранилищ газа, характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца. Оборудование и обвязка компрессорной станции приспособлены к переменному режиму работы магистрального газопровода, но это приводит к снижению загрузки газоперекачивающего агрегата и перерасходу энергопотребления из-за отклонения от оптимального КПД.

В настоящее время одним из направлений в совершенствовании, повышении надежности и экономической эффективности газоперекачивающих агрегатов является применение электромагнитных подшипников приводных двигателей и газовых нагнетателей.

В работе, на примере газового нагнетателя мощностью 16 мВт перекачивающей станции «Помарская» газопровода «Уренгой – Помары – Ужгород», рассматриваются вопросы построения цифровой системы управления радиальным и осевым электромагнитными подшипниками (ЭМП). Рабочие зазоры между статором и ротором нагнетателя составляют 0.1 мм при весе ротора нагнетателя около одной тонны.

Система регулирования может быть двухконтурная и трехконтурная.

В разомкнутом состоянии система является неустойчивой. Постоянная времени внутреннего контура тока достаточно велика (~ 50 мс), что приводит к необходимости большой форсировки по источнику питания.

Силовая схема полупроводникового преобразователя, обеспечивающего регулирование тока электромагнита подшипника, представлена на рис. 1.

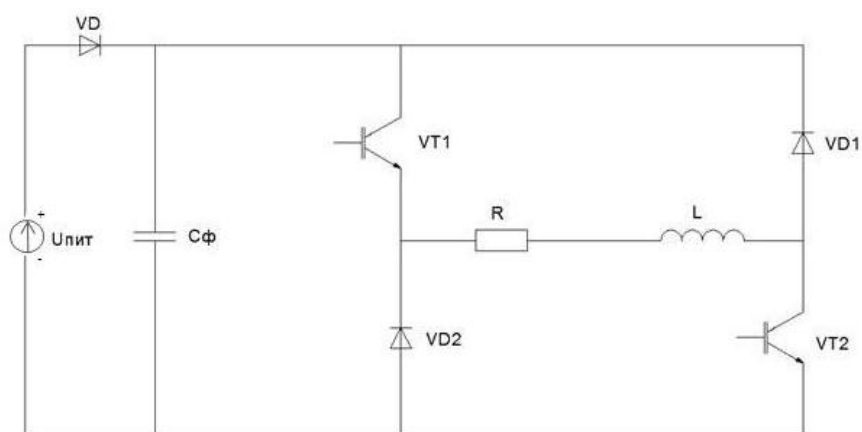


Рис. 1. Схема питания обмотки электромагнита

Здесь в качестве коммутирующих элементов применены IGBT транзисторы, работающие в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой 1-2 кГц. Контур регулирования тока в общем случае может быть представлен рис. 2.

При этом постоянная времени T_{Σ} электромагнита не постоянна и зависит от величины зазора между статором и ротором ЭМП.

Преобразователь представлен как апериодическое звено первого порядка. Здесь $T_{п1}$ - малая постоянная времени преобразователя, определяемая несущей частотой, $K_{п1}$ - коэффициент передачи. В соответствии со структурной схемой объект представляет собой два последовательно соединенных апериодических звена с малой ($T_{п1}$) и большой (T_{Σ}) постоянными времени.



Рис. 2. Структурная схема контура тока ЭМП

Рассмотрим три варианта построения регулятора тока:

- пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор;
- релейный регулятор;
- релейный регулятор, работающий в скользящем режиме.

В первом случае для определения параметров ПИ регулятора используется модульный оптимум.

Передаточная функция регулятора равна:

$$W_{PT}(s) = K_{pm} \cdot \frac{(1+T_0s)}{T_0s},$$

где $K_{pm} = \frac{R_э \cdot T_э}{2T_\mu \cdot K_{ПТ} \cdot K_{дт}}$ - пропорциональное звено; $\frac{(1+T_0s)}{T_0s}$ - изодромное звено.

С таким регулятором контур тока является астатическим как по заданию, так и по возмущению.

Перерегулирование при оптимизации на модульный оптимум составляет 4.3%.

Переходный процесс изменения тока в ЭМП при набросе задания представлен кривой I (рис. 3).

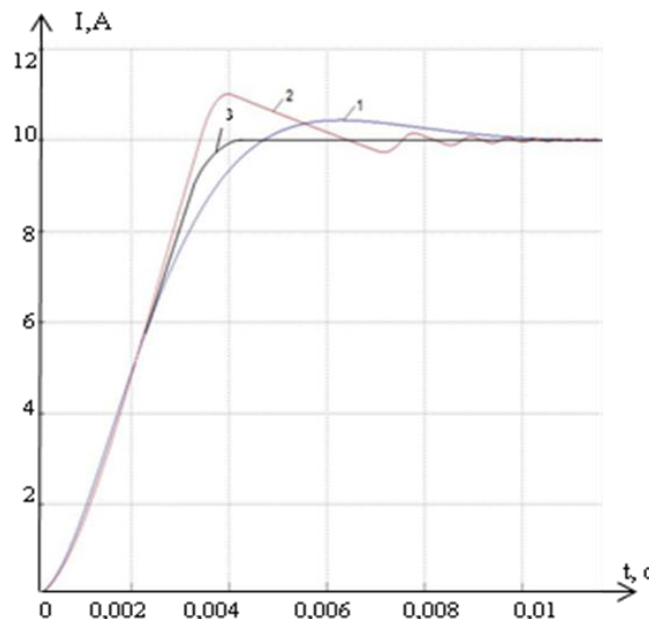


Рис. 3. Кривые переходных процессов тока ЭМП при различных регуляторах тока:

1 - ПИ регулятор; 2 - релейный регулятор; 3 - релейный регулятор, работающий в скользящем режиме

Релейный регулятор контура тока характеризуется "петлей гистерезиса", в ряде случаев определяющей характер переходного процесса. Структурная схема контура тока ЭМП представлена на рис. 4.

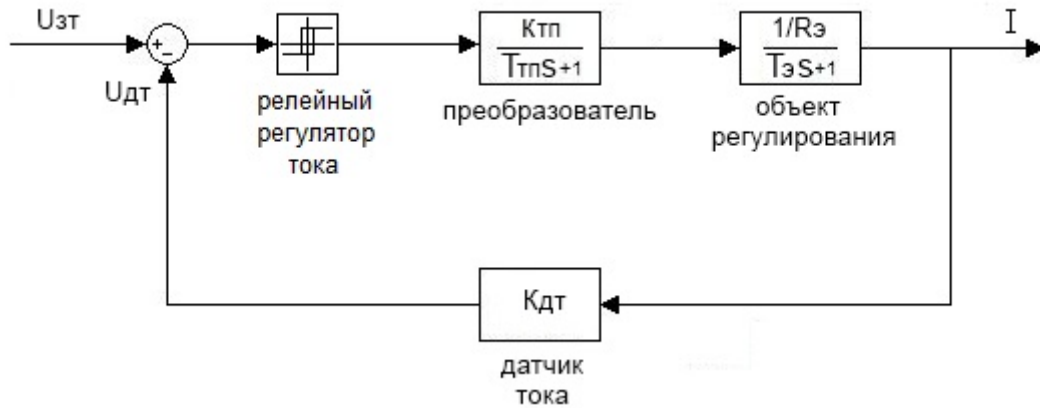


Рис. 4. Структурная схема контура тока ЭМП с релейным регулятором

Такой регулятор обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно яркий колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания, шириной петли гистерезиса регулятора и постоянной времени $T_{тп}$. Кривая переходного процесса при скачке задания представлена кривой 2 (рис. 3), которая имеет большие перерегулирование и колебательность, чем при модульном оптимуме.

Релейный регулятор, работающий в скользящем режиме, структурная схема которого представлена на рис. 5, обеспечивает наиболее оптимальный с точки зрения быстродействия и перерегулирования переходный процесс (кривая 3, рис. 3).

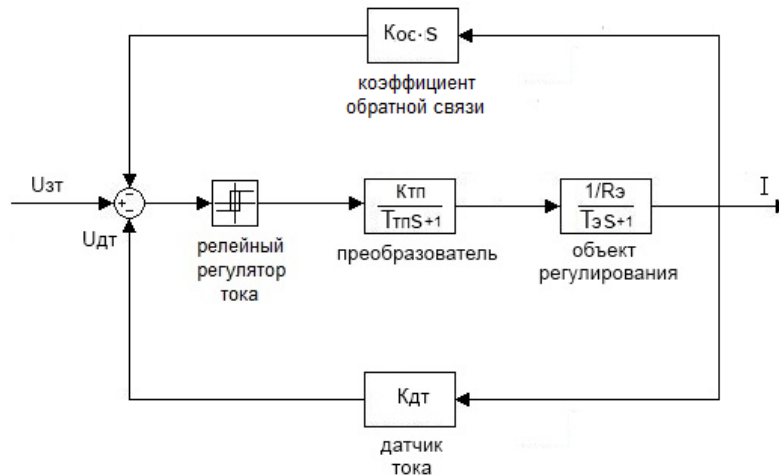


Рис. 5. Структурная схема контура тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме

Режим скольжения обеспечивается гибкой обратной связью по регулируемому параметру, что позволяет иметь на последнем этапе переходного процесса аperiodический характер изменения тока. Оптимизация этого режима определяется не только петлей гистерезиса и несущей частотой коммутации силового блока, но и глубиной обратной связи (K_{oc}).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме.

Библиографический список

1. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. Абдурагимов, А. С. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА / А.С. Абдурагимов, А. В.Носков, А. П. Сарычев // Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования: тр. 15-го Международного симпозиума. – СПб., 2010. – 128 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.12.2013*

A.E. Naumets, R.S. Taganov, A.N. Kuzmenkov, G.M. Miryasov, V.G. Titov

OPTIMIZATION OF CURRENT CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMAGNETIC BEARING

LLC "Gazpromavtomatizatsiya",
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: construction of the current control circuit of the electromagnetic bearing for gas blower with the capacity of 16 MW with various embodiments of the regulators: PI controller, relay and relay operating in sliding mode.

Methodology : to calculate the regulator used the method of transfer functions . The analysis of the impact of various types of the regulators on the quality of the transition process in the current loop . It is shown that the best performance in speed and overshoot has a relay regulator operating in sliding mode .

Results: the results of modeling of electromagnetic bearing control system to a step change at the input. The results are used in the construction of the control system electromagnetic bearing blower pumping unit at the compressor station "Pomarskaya".

Key words: electrmagnetic bearing, relay operating, optimizatijn of the current loop, cjntrol sistem.

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков¹, О.С. Хватов²**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Волжская государственная академия водного транспорта²

Цель: Разработка сервопривода управления топливоподачей автономных дизель-генераторов переменной частоты вращения, которые могут применяться для электроснабжения удаленных районов и автономных объектов. Актуальность разработки таких сервоприводов определяется тем, что их применение в составе автономных дизель-генераторов позволяет получить существенную экономию топлива и продлить моторесурс электростанций.

Методы исследования: Имитационная модель дизель-генератора переменной скорости вращения с системой управления топливоподачей на основе нейросетевого алгоритма разработана в пакете MATLAB. Для обучения нейронной сети использован метод обратного распространения ошибки.

Результаты: Разработана функциональная схема дизель-генератора переменной скорости вращения на базе синхронного генератора. Разработана функциональная схема и алгоритм работы интеллектуального сервопривода топливного насоса дизель-генераторной установки переменной скорости вращения.

Выводы: Реализация сервопривода управления топливоподачей на основе нейросетевого алгоритма позволяет осуществлять оптимальное управление дизель-генератором при отсутствии многопараметровой характеристики дизеля и при изменяющихся внешних (атмосферное давление, температура и влажность воздуха) и внутренних (степень износа дизеля, марка и качество топлива) условиях его работы.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, синхронный генератор, преобразователь частоты.

Системы «дизель-генератор» (Д-Г) строятся, как правило, на базе синхронных генераторов (СГ). Требование обеспечения стабильной частоты выходного напряжения ($f_1 = \text{const}$) СГ обуславливает необходимость стабилизации частоты вращения (ω) вала дизеля независимо от мощности нагрузки (P). Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива. Оптимального режима работы дизеля можно достигнуть, если с изменением P изменять ω дизеля [1].

Исследования показывают, что уменьшение ω при снижении нагрузки позволяет сократить удельный расход топлива на 20-30%. Одновременное изменение ω и P нагрузки обеспечивает также оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение износа и, следовательно, повышает его моторесурс. Однако при этом должно выполняться требование $f_1 = \text{const}$ при $\omega = \text{var}$.

Построение системы Д-Г с переменной ω возможно на базе преобразователя частоты (ПЧ) (рис.1) [2].

Устройство работает следующим образом. Интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей, представленный блоком 7, получает сигнал с блока вычисления мощности нагрузки 15, который соединен с выходами датчика напряжения 14 и датчика тока 4, измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе преобразователя частоты (ПЧ) 3. В зависимости от значения мощности нагрузки блок 8 задания экономичного режима (ЗЭР), в программу работы которого заложены оптимальные зависимости частоты вращения дизеля I от мощности нагрузки, соответствующие минимальному расходу топлива, формирует сигнал, пропорциональный оптимальной частоте вращения вала дизеля I . Этот сигнал поступает на вход электропривода 9 перемещения рейки топливного насоса, который поддерживает частоту вращения дизеля I на уровне, заданном блоком 8.

Поскольку частота вращения вала дизеля I будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения СГ 2 будут также при этом изменяться. Стабилизация амплитуды переменного напряжения на выходных выводах 6 на

уровне номинального значения для СГ 2 осуществляется с помощью ПЧ 3 и повышающего трансформатора 5.

Стабилизация выходного напряжения ПЧ 3 на заданном уровне осуществляется с помощью блока 12 стабилизации напряжения. Для повышения выходного напряжения на выходных выводах 6 до уровня номинального напряжения СГ 2 на выходе ПЧ 3 установлен повышающий трансформатор 5. Блок 10 возбуждения СГ 2, получающий питание через выводы 11 подключения питания, формирует ток в обмотке возбуждения СГ 2 с учетом сигнала от блока 8 ЗЭР и от датчика напряжения 14.

Частота выходного напряжения на выходных выводах 6 при изменении частоты вращения вала дизеля 1 поддерживается неизменной с помощью ПЧ 3 на уровне, задаваемом блоком 13 задатчика частоты выходного напряжения.

Функциональная схема ЗЭР приведена на рис. 2. ЗЭР состоит из четырех основных элементов: контроллера управления КУ, ассоциативной памяти АП, контроллера обучения КО и энергонезависимой памяти типа Flash, которые объединены общей информационной шиной, допускающей двунаправленный обмен информацией и дальнейшее расширение системы в случае управления несколькими Д-Г.

Важное достоинство нейронных сетей данного типа – способность решать задачу аппроксимации табличной функции многих переменных, дополненная процедурой интерполяции (экстраполяции).

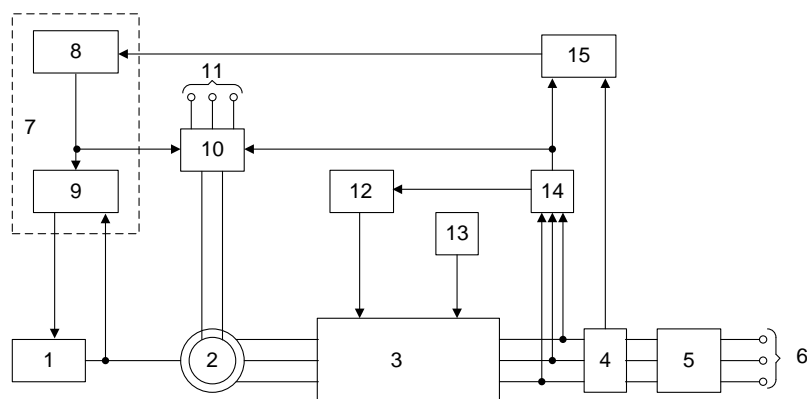


Рис. 1. Функциональная схема системы Д-Г переменной частоты вращения:

1 – дизель; 2 – СГ; 3 – ПЧ; 4 – датчик тока; 5 – повышающий трансформатор; 6 – выходные выводы; 7 – интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей; 8 – ЗЭР; 9 – электропривод перемещения рейки топливного насоса; 10 – блок возбуждения СГ; 11 – выводы подключения питания блока возбуждения СГ; 12 – блок стабилизации напряжения; 13 – задатчик частоты выходного напряжения; 14 – датчик напряжения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки

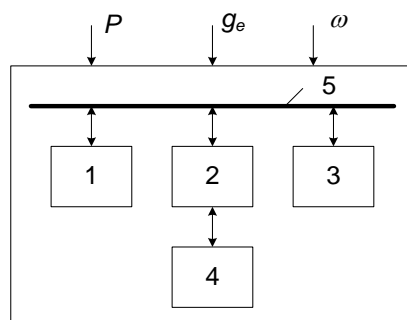


Рис. 2. Функциональная схема ЗЭР:

1 – контроллер обучения (КО); 2 – контроллер управления (КУ); 3 – ассоциативная память (АП); 4 – память данных; 5 – информационная шина

АП модели ЗЭР состоит из трех слоев - входного, скрытого и выходного (рис. 3). Входной слой выполняет нормировку и распределение входных данных. Скрытый слой состоит из двух нейронов, функцией активации которых является гиперболический тангенс. Сигналы нейронов скрытого слоя отображаются в выходной слой линейно. Выходной слой суммирует сигналы скрытого слоя и нормализует их.

В пакете MATLAB разработана имитационная модель ЗЭР, работающая совместно с моделью Д-Г переменной частоты вращения и позволяющая имитировать его работу в статических режимах. Для удобства работы с моделью создан графический интерфейс пользователя. Перед началом имитационного моделирования задается текущее значение мощности нагрузки P в относительных единицах. Результаты расчета представляют собой значение оптимальной частоты вращения $\omega_{\text{опт}}$ и значение удельного расхода топлива g_e .

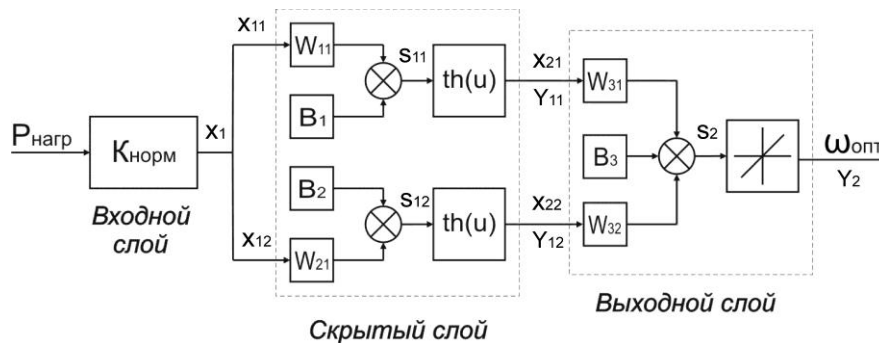


Рис. 3. Структурная схема нейронной сети АП

При расчете значения $\omega_{\text{опт}}$ для текущего значения P в модели АП производится решение следующих уравнений:

$$x_{i1} = P \cdot K_{\text{норм}},$$

$$x_{i2} = th(x_{i1} \cdot W_{i1} + B_i),$$

$$\omega_{\text{опт}} = \left(\sum_{i=1}^n W_{i2} \cdot x_{i2} + B_i \right) \cdot 1 / K_{\text{норм}},$$

где x_{i1} , x_{i2} – соответственно входы i -го нейрона слоев 1 и 2 АП; $K_{\text{норм}}$ – коэффициент нормализации, служащий для приведения значения мощности нагрузки к единичному базису нейронной сети.

Основными параметрами расчета по приведенным ранее формулам являются значения весовых коэффициентов W_{ij} и смещений активационной функции нейрона B_j , определяемых в результате обучения нейронной сети АП.

Обучение нейронной сети АП осуществляется КО (рис. 2), в модель которого заложен алгоритм обратного распространения ошибки, подробно описанный в литературе, посвященной данной тематике [3]. Целью обучения сети в соответствии с данным алгоритмом является такая настройка ее весов, при которой приложение некоторого множества входов приводило бы к требуемому множеству выходов.

На шаге прямого расчета АП осуществляется прямой проход АП от входного слоя к выходному. При этом на входы сети подается входной вектор мощности нагрузки P . Значения выходов рассчитываются по следующим формулам:

$$s_j^{(n)} = \sum_{i=0}^M y_i^{(n-1)} \cdot W_{ij}^{(n)},$$

$$y_j^{(n)} = th(s_j^{(n)}), \omega_q \equiv P_q,$$

где M – число нейронов в слое n ; $y_{i(j-1)}^n$ – выход i нейрона ($j-1$) слоя n ; x_{ij}^n – вход i нейрона (j) слоя n ; P_q – компонента q входного вектора P ; ω_q – компонента q выходного массива скоростей ω .

Для выходного слоя и скрытого слоя n (рис. 4) рассчитывается величина ошибки δ :

$$\delta_j^{(n)} = (y_j^{(n)} - d_j) \frac{\partial y_j}{\partial s_j},$$

где d_j – идеальное (желаемое состояние нейрона).

Также для выходного слоя n рассчитываются изменения весов:

$$\Delta W_{ij}^{(n)} = -\beta \cdot \delta_j^{(n)} y_i^{(n-1)},$$

где β – коэффициент обучения, выбираемый меньше единицы, для придания «инерционности» процессу обучения.

Расчет повторяется до тех пор, пока ошибка работы сети АП E_ω не станет меньше допустимой.

Алгоритм обратного распространения ошибки использует разновидность градиентного спуска, т.е. осуществляет спуск вниз по поверхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму ошибки. Однако в процессе обучения сеть может попасть в локальный минимум. В точке локального минимума все направления градиента ведут вверх, и сеть неспособна из него «выйти». На этот случай в разработанном авторами алгоритме обучения предусмотрено смещение одного из текущих значений весовых коэффициентов W_{ij} на некоторую случайную величину. Если повторение данной процедуры несколько раз приведет алгоритм в одно и то же состояние, то можно с уверенностью считать, что найден глобальный минимум и процесс обучения может быть завершен. На рис. 4 приведены кривые изменения функции ошибки E_ω , весовых коэффициентов W_{ij} и смещений B_j в зависимости от количества эпох обучения n . На рис. 4 пунктирной линией показан момент достижения допустимой величины ошибки. Необходимым условием для корректного обучения нейронной сети АП является наличие «обучающего множества» – множества логических пар $\omega_{\text{опт}} = f(P)$, полнота и точность значений которого, в конечном итоге, определяет точность и скорость работы ЗЭР в целом. Табличный массив значений $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ для дискретных значений P хранится в памяти данных ЗЭР (рис. 2). Алгоритм формирования этого массива авторами подробно описан в [4].

На рис. 5 приведена кривая, полученная в результате работы модели ЗЭР совместно с моделью Д-Г типа SDMO DIESEL 4000 E XL (мощность - 4 кВт, номинальная частота вращения - 1500 об/мин). При этом система управления топливоподачей Д-Г формирует задание на изменение частоты вращения дизеля с периодом не менее 0.5 с, чтобы скачки напряжения на выходе ПЧ не превышали 5%. Моделирование проводилось для относительных значений мощностей нагрузки в диапазоне от 0.00 до 1.00 с шагом 0.05. Точками обозначены дискретные значения, рассчитанные с помощью КО. Сплошной линией показана непрерывная зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$, полученная на основе дискретных значений с помощью АП. При этом значения $\omega_{\text{опт}}$, рассчитанные с помощью АП, отличаются от дискретных значений, определенных КО для соответствующих значений P , на величину, не превышающую 0.03% от номинального значения частоты вращения ω вала дизеля.

Анализ полученных значений показывает, что наибольшая погрешность работы АП приходится на граничные точки диапазона обучения. В случае выхода за его пределы значения $\omega_{\text{опт}}$, определяемые АП, в целом согласуются с критериями минимального расхода, не являясь случайными величинами.

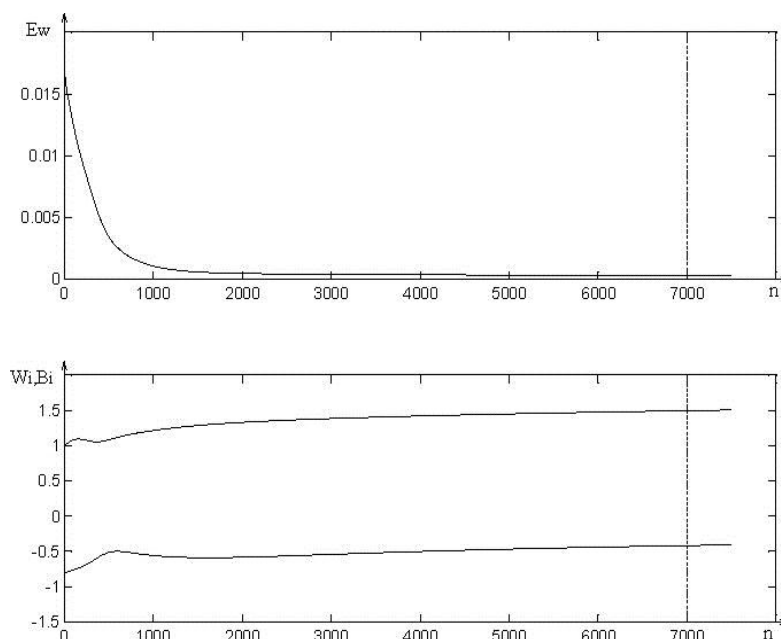


Рис. 4. Зависимости ошибки E_w , весовых коэффициентов W_{ij} и смещений B_j в функции количества эпох обучения n

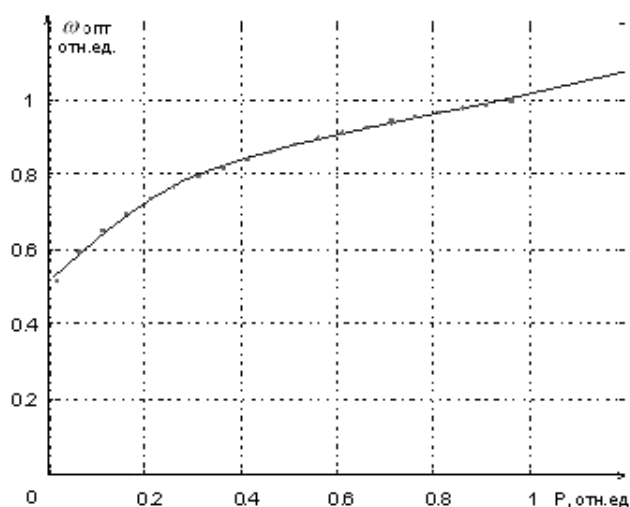


Рис. 5. Результат работы модели ЗЭР совместно с Д-Г

Погрешность при этом возрастает по мере удаления от границ диапазона обучения и может достигать единиц процента.

Разработанные при моделировании в Matlab алгоритмы реализуются на базе современной микропроцессорной техники при создании авторами экспериментального образца Д-Г переменной скорости вращения.

Библиографический список

1. **Хватов, О.С.** Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник ИГЭУ. 2010. Вып. 2. С. 53–56.
2. **Пат.** 2412513 Российская Федерация МПК Н 02 J 3/34. Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5.

3. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Изд-во «Вильямс», 2001. – 287 с.
4. **Хватов, О.С.** Модель задатчика экономичного режима работы дизель-генераторной установки с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Актуальные проблемы электроэнергетики: мат-лы XXX научно-техн. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 65–70.

*Дата поступления
в редакцию 10.12.2013*

A.B. Daryenkov¹, O.S. Khvatov²

CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS DIESEL GENERATOR CHARACTERIZED BY ALTERNATING FREQUENCY ROTATION OF SHAFT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Volga state academy of wafer transport², Nizhny Novgorod

Purpose: Servo-driver of control of the fuel pump of autonomous diesel generator characterized by alternating frequency rotation of shaft, which can be applied to power supply of remote areas and autonomous objects. The urgency of the engineering of such servo-driver is defined by means of the fact, that their application as a part of autonomous diesel generator allows to receive essential economy of fuel and to prolong motor potential of electric power station.

Design/methodology/approach: The imitating model of the diesel generator characterized by alternating frequency rotation of shaft with a control system of fuel feeding on the basis of neuronetwork algorithm is developed in a MATLAB. For training of a neural network the method of the return distribution of a mistake is used.

Findings: The engineering of the flow sheets of diesel generator based on a synchro generator and characterized by alternating frequency rotation of shaft. The engineering of the flow sheet and algorithm of operation for intellectual servo-driver of control of the fuel pump of autonomous electric power station characterized by the lowered fuel consumption.

Originality/value: Servo-driver realization controls of fuel feeding on the basis of neuronetwork algorithm allows to exercise optimum control of the diesel generator in the absence of the multiparameter characteristic of the diesel and at changing external (atmospheric pressure, temperature and humidity of air) and internal (degree of wear of the diesel, brand and quality of fuel) conditions of its work.

Key words: electric power station, diesel generator, synchrogenerator, converter.

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин

**ГОРОДСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ 10-20 кВ
С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вопрос построения новой конфигурации распределительных сетей 20 кВ. Предложены принципы формирования гексагональных сетей с активно-адаптивной системой управления узлами нагрузки. Приведены результаты Matlab моделирования сетей на примере распределительных сетей Нижнего Новгорода.

Ключевые слова: гексагональная конфигурация распределительных сетей, активно-адаптивная система управления, равномерно-распределенная сеть 20 кВ, PLC модем, интерфейс, интеллектуальные сети.

В современных городах-миллионниках часто имеют место проблемы электроснабжения, связанные с постоянным увеличением нагрузок, отставанием сетевой инфраструктуры от потребности в электрической энергии и мощности, значительными потерями электроэнергии в распределительных сетях (до 16%), физическим и моральным износом электрооборудования. В существующих распределительных сетях 6-10 кВ невозможно реализовать автоматическое управление распределением и потреблением электроэнергии на всех уровнях напряжения. Все это приводит к техническому пределу использования систем питания и распределения и, как следствие, к снижению надежности электроснабжения потребителей и авариям. Таким образом, переход на сети 20 кВ с радиально-магистральной конфигурацией (подобно сетям 6 – 10 кВ) не даст ожидаемых результатов. Новое направление развития электрических сетей – интеллектуальные сети (Smart Grid), направлено на модернизацию всей отрасли электроэнергетики.

Концепция «Smart Grid» предусматривает следующие основные задачи:

- обеспечение и повышение надежности распределительной сети;
- автоматическое управление элементами сети по адаптивным алгоритмам;
- управление режимами сети и локализация повреждений.

Единая технологическая и информационная платформа позволяет перейти от жесткой радиально-магистральной архитектуры сети к более гибкой равномерно распределенной сети, которая является адаптивной, при этом каждый узел сети является активным элементом, позволяющим производить переконфигурацию сети в соответствии с оптимальным режимом работы. Примером такой сети является гексагональная распределительная сеть, описанная в [1, 2, 3] и приведенная на рис. 1

Равномерно-распределенная электрическая сеть гексагонального типа позволяет реализовать концепцию гибких распределительных сетей.

Гексагональная сеть – это совокупность территориально равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой проводниками одинакового сечения и имеющая топологию в виде правильных шестиугольников (сотовая конфигурация электрической сети).

Одним из вопросов построения равномерно-распределенной сети сотовой конфигурации является шаг сети (длина линий между узлами).

Выбор шага сети между подстанциями на основании плотности нагрузки, делает возможным связать количество и мощность трансформаторов на РП с площадью рассматриваемой территории города. Исходя из этого, шаг сети (рис. 2) рассчитывается по следующей формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}}}{3\sqrt{3} \cdot n_{\text{рп}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}} \cdot S_{\text{рп}}}{3\sqrt{3} \cdot S_{\text{расч}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}} \cdot (S_{\text{т}} \cdot n_{\text{т,узла}})}{3\sqrt{3} \cdot S_{\text{расч}}}}, \quad (1)$$

где d – шаг сети, т.е. расстояние между узлами нагрузки (между РП), км; $S_{\text{расч}}$ – расчетная мощность потребления электроэнергии рассматриваемого района, МВА; $\Theta_{\text{гор}}$ – площадью рассматриваемой территории, км²; $n_{\text{рп}}$ – число распределительных пунктов; $S_{\text{рп}}$ – единичная мощность распределительного пункта, МВА; $n_{\text{т,узла}}$ – число трансформаторов, питающихся от РП; $S_{\text{т}}$ – единичная мощность трансформатора, питающегося от РП, МВА.

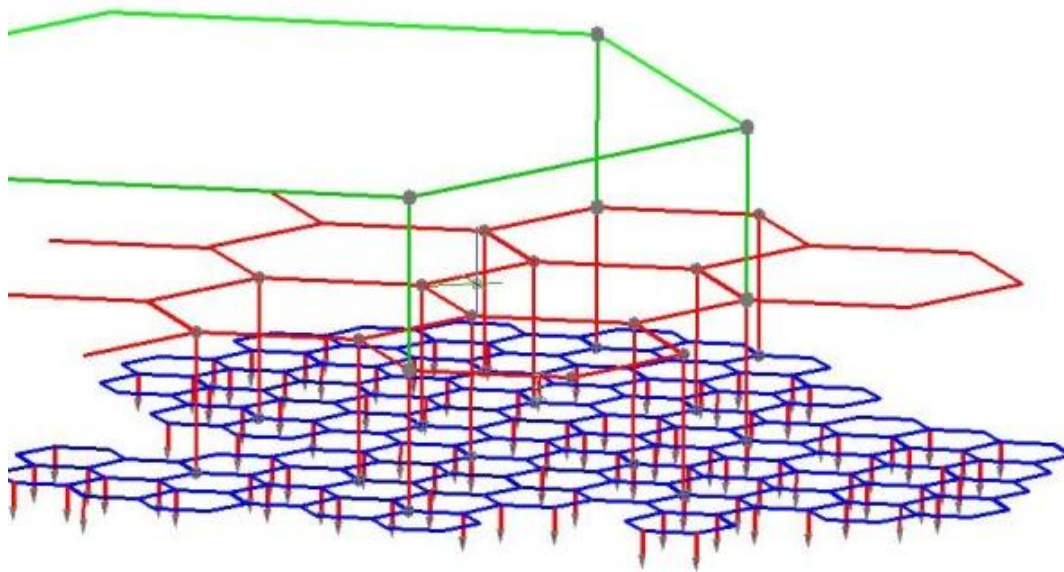


Рис. 1. Структура гексагональной распределительной сети различных уровней напряжения

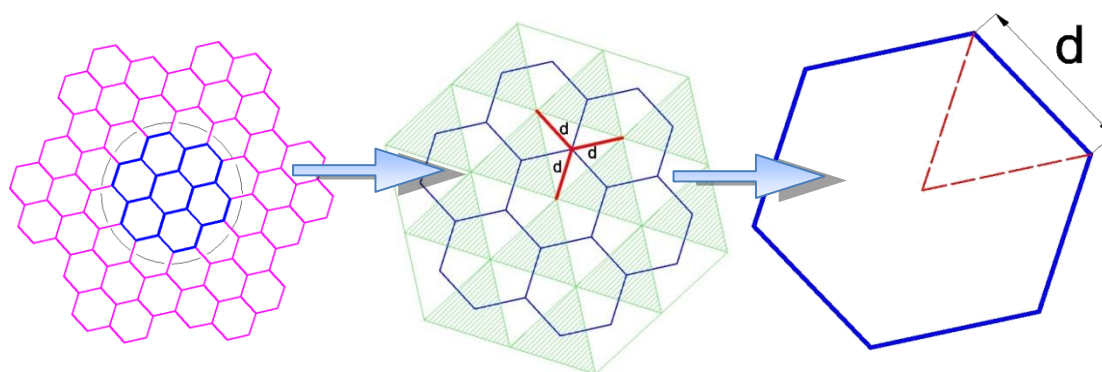


Рис. 2. Выбор шага сети

Если представить площадь, «покрываемую» узлом нагрузки (УН), в виде равностороннего треугольника, то расстояние от УН до потребителя будет всегда наименьшим в пределах данного треугольника.

Многokратно реконструируемые существующие в городские радиальные распределительные сети имеют большое количество резервных связей между распределительными пунктами 6-10 кВ (резервных перемычек), которые в нормальном режиме отключены (рис. 3). При авариях перемычки часто не справляются с обеспечением послеаварийного режима. В итоге низкая надежность сети.

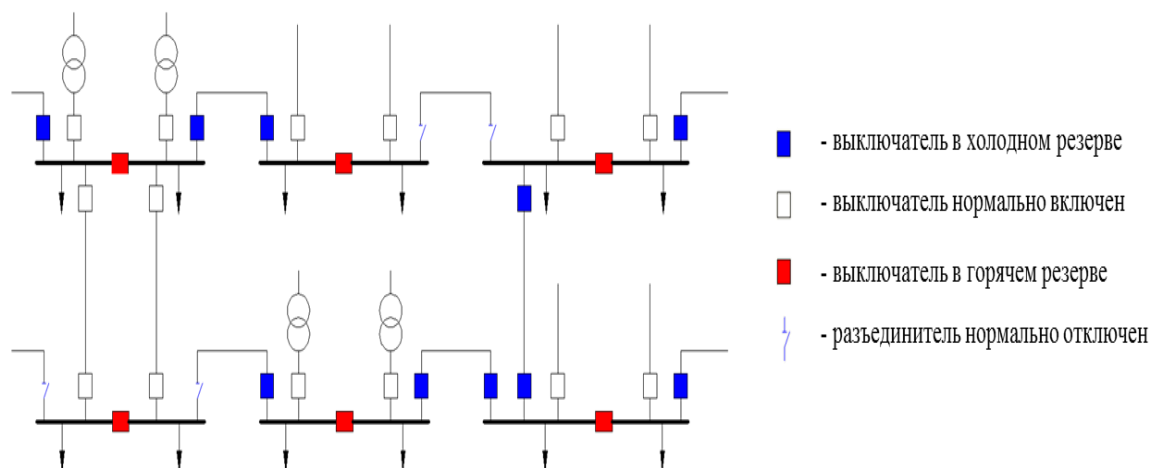


Рис. 3. Пример организации схем электроснабжения (питающие подстанции и распределительные пункты 6 – 10 кВ)

Многочисленные дискуссии о переходе в распределительных сетях на напряжение 20 кВ не приходят к консенсусу. Какие конфигурации сетей брать за основу. Примером зарубежного опыта сооружения сетей 20 кВ может быть схема распределительной сети Парижа, приведенная на рис. 4, в которой использованы кольцевые перемычки для резервирования.

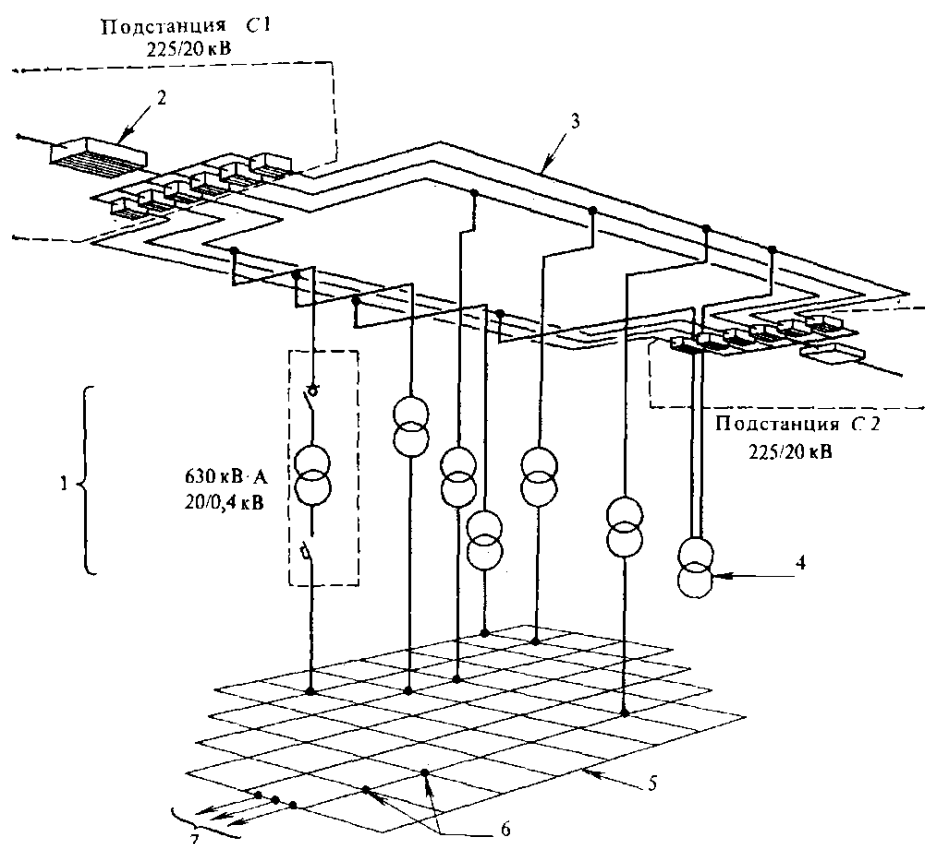


Рис. 4. Распределительная сеть Парижа (разветвленная сеть НН питается от магистральной линии 20 кВ):

1 – типовая подстанция СН/НН; 2 – линейный выключатель; 3 – половина магистральной линии СН; 4 – потребитель СН; 5 – разветвленная сеть НН; 6 – распределительные коробки сетей НН (на углах улиц); 7 – подключения сетей зданий

Поиск разнообразных схемных решений направлен на создание схем позволяющих автоматизировать процесс управления ими.

Наше предложение - **Гексагональные сети**, которые позволяют решить эти проблемы и перейти к четкой системной конфигурации сети, в которой все кабельные линии между РП находятся в работе, а сами РП питаются по трем линиям. Это позволяет сделать сеть более гибкой к ведению режима и увеличить надежность электроснабжения потребителей. Каждый узел в гексагональной сети является универсальным, а, следовательно, алгоритмы управления таких узлов универсальны.

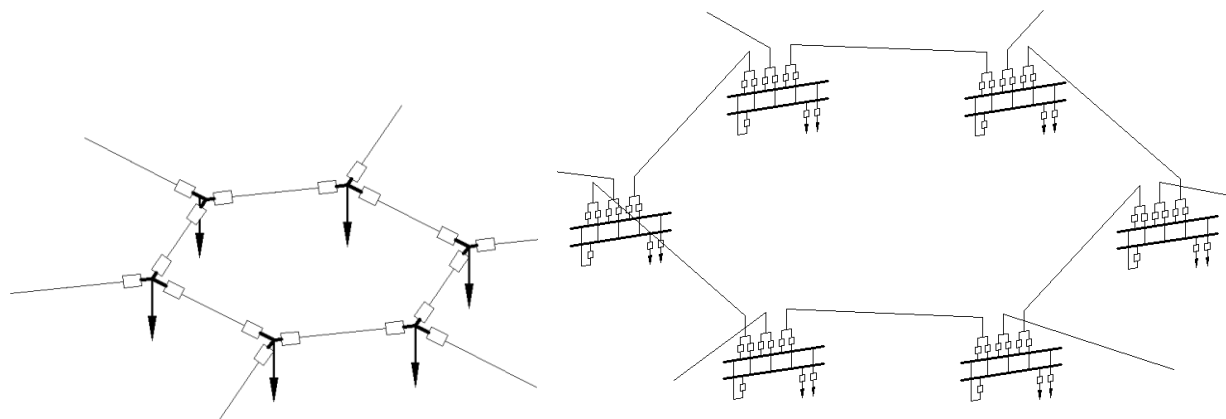


Рис. 5. Ячейка гексагональной сети с распределительным устройством в узлах нагрузки

Переход к гексагональным сетям ведет к параллельной работе источников питания, что может привести к увеличению токов короткого замыкания в узлах нагрузки. Для некоторых устройств это недопустимо по динамической устойчивости.

Существующие методики расчета ТКЗ не применимы к гексагональным сетям. Действующий ГОСТ Р 52735-2007 регламентирует инженерный расчет ТКЗ в радиальных схемах. Для более сложных схем применяются методы контурных токов и узловых потенциалов [4,5]. Использование данных методик удобно в научных исследованиях, но не применимо к выбору гексагональных распределительных сетей. Поэтому была поставлена задача: выявить оптимальную методику инженерного расчета токов короткого замыкания в гексагональных распределительных сетях, а также определить оптимальную конфигурацию гексагональной распределительной сети.

Для исследования режимов работы гексагональных сетей были разработаны однолинейные Simulink-модели сети для района Нижнего Новгорода, имеющего среднюю плотность нагрузки 9 МВА/км².

Параметры сети при различных режимах работы рассчитывались для двух рабочих линейных напряжений 10 и 20 кВ. Питающие узлы были заданы, исходя из возможной перспективы развития городской сети ВН. Предложена упрощенная методика инженерного расчета ТКЗ в гексагональных распределительных сетях.

Ток короткого замыкания i -го узла равен току, рассчитанному по эквивалентной схеме. Для построения эквивалентной схемы замещения, необходимо на графе от каждого питающего узла определить минимальное расстояние до точки КЗ, т.е. число линий N_i единичной длины (равных шагу сети). Величина коэффициента ветвления - k зависит от удаленности точки КЗ от источника питания:

$$I_{\text{кз}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{k \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{\text{сист}} + Z \cdot N_i} \right]^{-1}}, \quad (2)$$

где E – напряжение питающего узла, В; N_i – число единичных линий i -й эквивалентной ветви; k – коэффициент ветвления, учитывающий удаленность точки КЗ от ближайшего питающего узла (ИП); $Z_{\text{сист}}$ – эквивалентное сопротивление системы, Ом; Z – сопротивление единичной линии, Ом.

Расчет токов короткого замыкания в компьютерных моделях различными методами показал, что значения ТКЗ, полученные по упрощенной инженерной методике, лежат в пределах 5%-ной погрешности по отношению к результатам, полученным в имитационной модели и рассчитанными матричным методом сингулярных ветвей.

Было установлено, что значения ТКЗ при числе питающих узлов в сети более двух превышают коммутационную способность выключателей 10 (20) кВ и как следствие возникает необходимость установки токоограничивающих реакторов в цепи «Трансформатор 110/10 (20) кВ – Шины питающего узла 10 (20) кВ»

В ходе экспериментов были выявлены факторы, влияющие на величину ТКЗ в гексагональных сетях. ТКЗ зависит:

- 1) от конфигурации сети;
- 2) числа питающих источников, работающих параллельно;
- 3) единичной мощности питающего источника.

Ряд моделей гексагональной сети имеют прямую привязку к «форме» города, что негативно сказывается на топологии сети: появляются участки, имеющие слабые связи, причем с уменьшением шага сети таких элементов становится больше. Рациональнее использовать сети эллиптической формы, которой можно добиться, поделив единую сеть на зоны (рис. б), имеющие резервные связи (по кабельным линиям) в горячем резерве. Данные связи позволяют питать потребители от соседней зоны, при потере у первой источника питания.

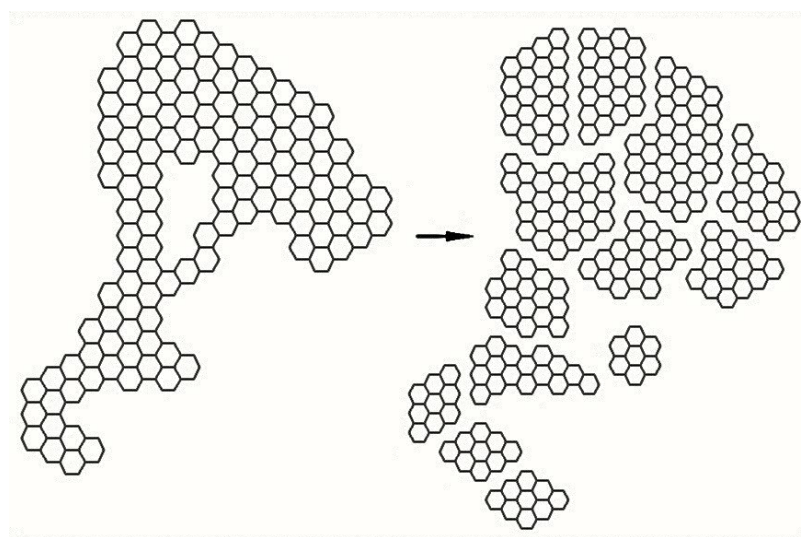


Рис. 6. Представление единой сети, состоящей из отдельных зон

Переход от единой сети к сети, состоящей из отдельных зон, позволяет снизить уровень токов короткого замыкания. Такой подход дает сеть гибкой и устойчивой в различных режимах работы, включая аварийные.

Уменьшение единичной мощности питающих узлов и использование одного понижающего трансформатора 110/10 (20) кВ уменьшает риск распространения аварий при повреждениях. Также в отдельных зонах можно более точно учитывать уровень загрузки района, а уменьшение шага сети повышает ее гибкость.

Гексагональная распределительная сеть, в узлах которой предполагаются интеллектуальные цифровые подстанции, имеет четкие алгоритмы управления, а общее корпоративное информационное пространство, которое используется электросетевой компанией для целей

управления, защит, мониторинга, позволит сделать сеть очень гибкой, значительно повысит качество и надежность электроснабжения потребителей (рис. 7).

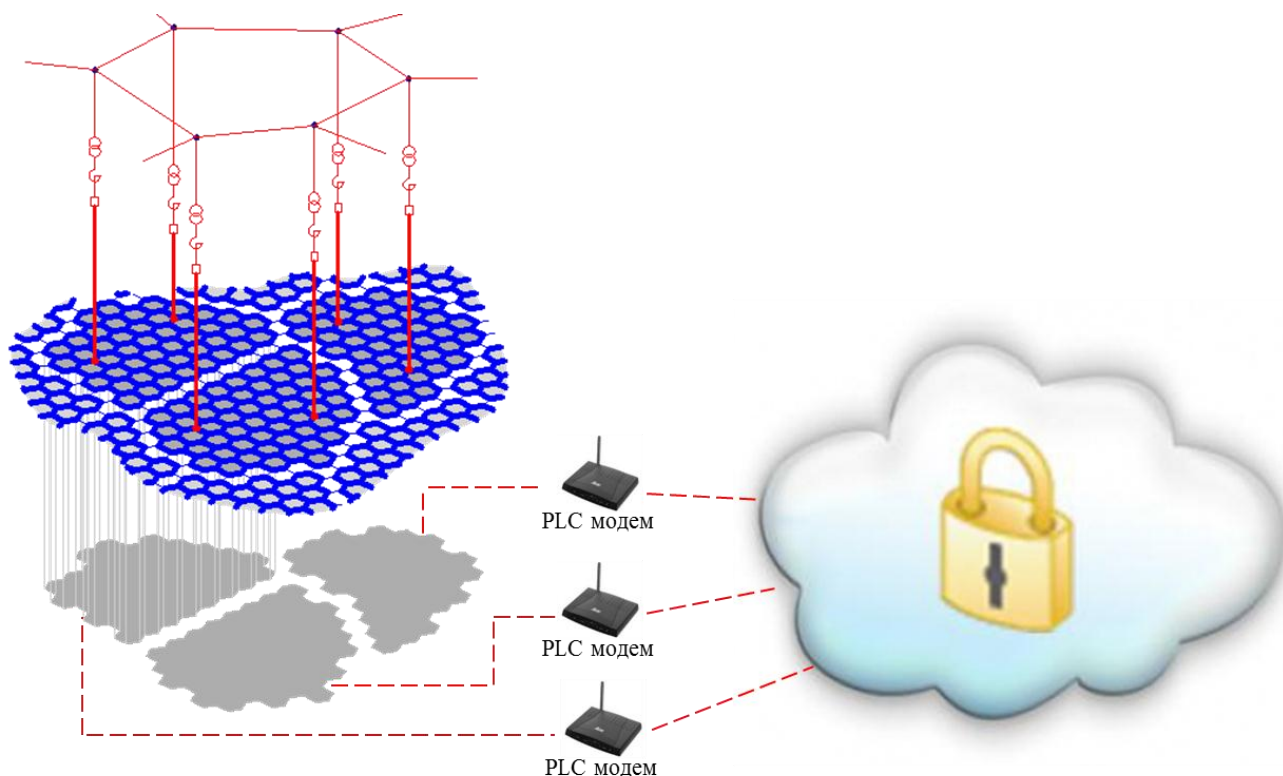


Рис. 7. Единое информационное корпоративное сетевое пространство гексагональной сети

Гексагональные распределительные сети позволят реализовать автоматическое управление распределением и потреблением электроэнергии, сделать сеть гибкой, вывести энергетику распределительных сетей на новый уровень, соответствующий современным мировым стандартам и запросам потребителей. **Реализация гексагональных сетей возможна только с использованием оборудования узлов нагрузки с цифровым управлением.**

В статье использованы материалы Государственного контракта от 11.10. 2011 г. № 16.526.12.6016 (11/692) с Министерством образования и науки РФ.

Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова». Белгород. 2011. №3. С. 148–152.
2. **Соснина, Е.Н.** Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ / Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. – 2012. № 5. С. 11–17.
3. Пат. №118133 Российская Федерация, МПК7 H02J 3/00 (2006 01). Система передачи электрической энергии / Лоскутов А. Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 2011154247; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.
4. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М., 2007.

5. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования

*Дата поступления
в редакцию 10.12.2013*

A.B. Loskutov, E.N. Sosnina, A.A. Loskutov, D.V. Zyrin,

URBAN DISTRIBUTION ELECTRIC GRIDS 10-20 kV WITH HEXAGONAL CONFIGURATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. Alexeev

Purpose: Concept of new configuration of urban distribution electric grids of 20 kV was proposed.

Design/methodology/approach: Existing urban distribution electric grids are highly depreciation and have a large number of non-ordered reserve links. Hexagonal networks have precise system configuration and they are able to complete algorithmization control due to their configuration

Findings: Hexagonal grids which consist of universal three-prong nodes were developed. 20 kV power grids with a hexagonal configuration will be more flexible to changes in electric regime. The new grid topology will increase reliability of power supply.

Research limitations/implications: Hexagonal configuration of electrical networks achieves maximum efficiency when new distribution networks are formed from individual hexagonal zones. Hexagonal zones have reserve connection with each other. Universal control algorithms are needed for working hexagonal electric grids 20 kV.

Originality/value: Implementation of hexagonal electric grids of 20 kV is possible while using the equipment load nodes with digital control Digital electrical substations will be the main element of an active-adaptive uniformly distributed power grids in the future.

Key words: hexagonal configuration of the distribution electric grids, active-adaptive control system, uniformly distributed electric grid of 20 kV, PLC modem, interface, smart grid.

УДК 621.314

А.И. Байков

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены математические описания и схемы замещения трансформаторов для характерных случаев моделирования силовой части электроприводов. Возможное насыщение магнитопроводов учтено с применением аналитической аппроксимации кривых намагничивания. Рассмотрены различные варианты вывода дифференциальных уравнений, воспроизводящих токи и напряжения, а также магнитный поток в стержне однофазного двухобмоточного трансформатора. Выражения для нелинейных собственных и взаимных индуктивностей обмоток схемы замещения трёхфазного трансформатора получены на основе матричного анализа электрических и магнитных цепей. Приведён пример вывода схемы замещения мощного однофазного многообмоточного трансформатора по данным опытов коротких замыканий пар обмоток с использованием взаимоиндуктивностей.

Ключевые слова: математическое моделирование, трансформатор, схема замещения, кривая намагничивания, аналитическая аппроксимация.

Анализ силовой части электропривода обычно производится с использованием схем замещения, которые разрабатываются на основе математических соотношений, или моделей, отражающих протекание процессов в элементах оборудования с учётом существенных физических особенностей. Особое значение имеют трансформаторы, соединяющие отдельные части схем посредством электромагнитного взаимодействия без гальванического соединения. Плотно расположенные обмотки связываются основными магнитными потоками в ферромагнитных стержнях и потоками рассеяния. В отдельных режимах магнитопроводы могут насыщаться, из-за чего увеличиваются намагничивающие составляющие в токах обмоток, изменяя их величину и форму.

В паспортных данных на трансформаторы приводятся номинальные токи и напряжения обмоток, КПД, схемы соединения, габаритные размеры и масса. Обычно даются результаты опытов холостого хода и короткого замыкания обмоток. Для получения дополнительной информации приходится обращаться к заводским материалам и специальной справочной литературе. Полные данные по материалам и конструкции обмоток и магнитопроводов практически недоступны. Так что разработка математических описаний и схем замещения трансформаторов выполняется с учётом ограниченного объёма сведений.

Общий подход к разработке схем замещения трансформаторов можно представить на простейшем примере однофазного двухобмоточного трансформатора. Существо подхода не изменится при переходе к многообмоточным трансформаторам и схемам, содержащим несколько трансформаторных элементов. Процесс передачи энергии трансформатором в упрощённом случае представляется на основе применения уравнений электрического равновесия напряжений обмоток, сформированных на основе закона электромагнитной индукции, и уравнения намагничивания магнитопровода на основе закона полного тока:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 r_1, \\ u_2 &= \frac{d\psi_2}{dt} + i_2 r_2, \\ hl &= i_1 w_1 + i_2 w_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\Psi_1, \Psi_2, i_1, i_2, r_1, r_2$ – потокосцепления, токи, активные сопротивления и числа витков обмоток, h – напряжённость в равномерно распределённом основном потоке намагничивания; l – длина средней силовой линии магнитопровода.

Потокосцепления обмоток разделяются на две части – по основному потоку Ψ_μ и потокам рассеяния Ψ_σ :

$$\Psi_1 = \Psi_{1\mu} + \Psi_{1\sigma}, \Psi_2 = \Psi_{2\mu} + \Psi_{2\sigma}$$

Потокосцепления по основному магнитному потоку представляются произведениями чисел витков обмоток на основной магнитный поток Φ , а потокосцепления рассеяния – как произведения соответствующих токов на индуктивности и взаимоиндуктивности рассеяния

$$\Psi_{1\mu} = w_1 \Phi, \Psi_{2\mu} = w_2 \Phi, \Psi_{1\sigma} = L_{1\sigma} i_1 + L_{12\sigma} i_2, \Psi_{2\sigma} = L_{12\sigma} i_1 + L_{2\sigma} i_2$$

В опыте короткого замыкания пренебрегается малым основным потоком намагничивания и напряжение питаемой обмотки Δu_k приравнивается сумме падений напряжений от рассеяния и на активных сопротивлениях обмоток при протекании номинального тока. В случае питания первичной обмотки

$$\Delta u_{k1} = \left(L_{1\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_2} L_{12\sigma} + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 L_{2\sigma} \right) \frac{di_1}{dt} + \left(r_1 + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 r_2 \right) i_1 = L'_k \frac{di_1}{dt} + r'_k i_1$$

где L'_k, r'_k – индуктивность и активное сопротивление короткого замыкания.

Индуктивность короткого замыкания с достаточной точностью учитывает падение напряжения на трансформаторе, обусловленное магнитными полями рассеяния. Во всяком случае, у разработчика силовой части электропривода нет данных, позволяющих уточнить значения индуктивностей рассеяния. В опыте короткого замыкания не проявляются потери в магнитопроводе от вихревых токов из-за малой величины магнитного потока. Поэтому имеет смысл увеличить это сопротивление до некоторой эквивалентной величины r_{ecv} , исходя из условия выделения дополнительных потерь при протекании рабочего тока, соответствующих потерям в опыте холостого хода.

Использование индуктивности рассеяния и активного сопротивления, определяемых в опытах короткого замыкания и холостого хода, позволяет заменить трансформатор с двумя разделёнными цепями односвязной схемой, предусматривающей объединение первичной и вторичной сторон с учётом коэффициента трансформации [1]. Однако более важно при рассмотрении силовых схем с вентильными преобразователями, электродвигателями и трансформаторными элементами сохранить гальваническое разделение электрических цепей в схеме замещения таким же, как в принципиальной схеме. С этой целью предлагается распределить эти компоненты между первичной и вторичной цепями так, чтобы их влияние согласовывалось с данными опытов. Например, в случае однофазного двухобмоточного трансформатора представить эти параметры в виде сумм:

$$R_1 = 0,5 r'_{ecv}, R_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 0,5 r'_{ecv}, L_1 = 0,5 L'_k, L_2 = 0,5 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 L'_k \quad (2)$$

В таком случае уравнения электрического равновесия обмоток трансформатора и намагничивания его магнитопровода с выражением величины магнитного потока и напряжённости через индукцию b :

$$\Phi = Sb, h = \frac{b}{\mu} \quad (3)$$

где S – площадь сечения магнитопровода; μ – абсолютная магнитная проницаемость, могут быть представлены:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= w_1 S \frac{db}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1, \\ u_2 &= w_2 S \frac{db}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2, \\ \frac{l}{S\mu} b &= i_1 w_1 + i_2 w_2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Величина и форма токов обмоток существенно изменяются при насыщении магнитопровода трансформатора, которое проявляется как нелинейная зависимость индукции от напряжённости магнитного поля (кривая намагничивания). Она получается из данных опыта холостого хода и может представляться различными способами. Удобно применение аналитической аппроксимации, например, с помощью гиперболической функции:

$$h = \alpha \sinh(\beta b) = \frac{\alpha (\exp(\beta b) - \exp(-\beta b))}{2}, \quad (5)$$

где α и β – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания. Можно отметить, что уменьшением α можно достичь более резкого колена у формируемой кривой, а уменьшением β можно приподнять эту кривую в область больших значений.

Например, коэффициенты $\alpha=30$ А/м и $\beta=3.5$ 1/Тл определены для однофазного трансформатора с параметрами: $l = 0,59$ м; $S = 0,0025$ м²; $w_1=370$; $w_2 = 180$; $L_1= 0,0016$ Гн; $L_2 = 0,0004$ Гн; $R_1=1$ Ом; $R_2=3,6$ Ом. Они обеспечивают практически приемлемое представление его кривой намагничивания (рис. 1).

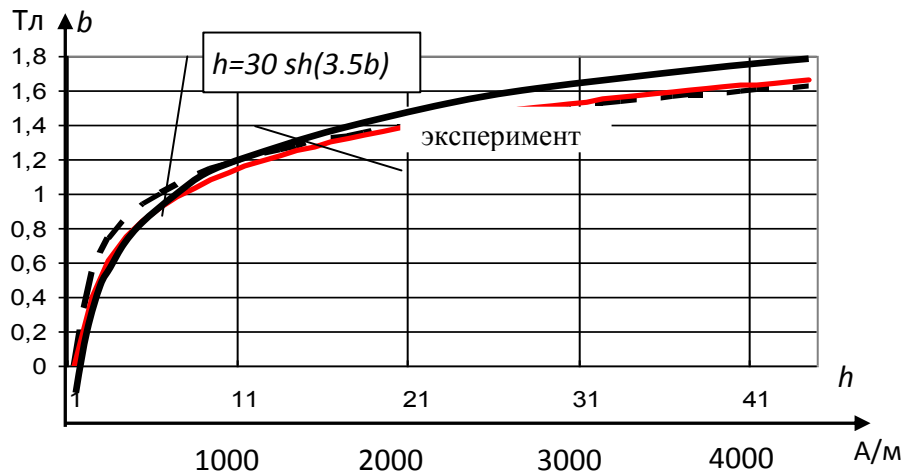


Рис. 1. Аппроксимация кривой намагничивания однофазного трансформатора гиперболическим синусом

Применение аналитической аппроксимации кривой намагничивания трансформатора позволяет вывести на основании (2) дифференциальные уравнения относительно независимых токов обмоток либо индукции и одного из токов. Так, ток первичной индукции выражается через индукцию и ток вторичной обмотки с использованием третьего уравнения (2). При подключённом к зажимам первичной обмотки источнике синусоидальной ЭДС получается уравнение (3) относительно напряжения u_2 на зажимах вторичной обмотки:

$$\begin{bmatrix} w_1 S + \frac{L_1 l \alpha \beta}{w_1} \cosh(\beta b) & -\frac{L_2 w_2}{w_1} \\ w_2 S & L_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} b \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \sin(\omega t) - \frac{R_1 l \alpha}{w_1} \sinh(\beta b) + \frac{R_1 w_2}{w_1} i_2 \\ u_2 - R_2 \cdot i_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

где учтено выражение тока первичной обмотки:

$$i_1 = \frac{l}{w_1} \alpha \cdot \sinh(\beta \cdot b) - \frac{w_2}{w_1} i_2, \tag{7}$$

а также дифференцирование (3) по правилу вычисления производной сложной функции:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{l \alpha}{w_1} \sinh(\beta \cdot b) - \frac{w_2}{w_1} i_2 \right) = \frac{l \alpha}{w_1} \frac{d(\sinh(\beta \cdot b))}{d(\beta \cdot b)} \frac{d(\beta \cdot b)}{dt} - \frac{w_2}{w_1} \frac{di_2}{dt} = \frac{l \alpha \beta}{w_1} \cosh(\beta \cdot b) \frac{db}{dt} - \frac{w_2}{w_1} \frac{di_2}{dt}.$$

В уравнении (6) производная напряжения индукции по основному потоку используется без дополнительных преобразований и интегрирования аппроксимирующих зависимостей, что является благоприятным фактором для численного интегрирования дифференциального уравнения. Дифференцирование же данной зависимости касается определения падения напряжения от рассеяния, которое по величине существенно меньше напряжения индукции по основному потоку. Однако наличие в числе независимых переменных индукции магнитного поля не вполне удобно для разрешения уравнений электрических цепей, поэтому более предпочтительно разрешать уравнения (4) относительно токов.

Из третьего уравнения (4) выражается индукция основного магнитного поля и дифференцируется

$$\frac{db}{dt} = \frac{w_1}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} \frac{di_1}{dt} + \frac{w_2}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} \frac{di_2}{dt},$$

что позволяет выразить напряжения обмоток трансформатора через токи как для обычной электрической цепи

$$U = L \frac{d}{dt} I + RI, \tag{8}$$

где

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_1 + \frac{w_1^2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} & \frac{w_1 w_2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} \\ \frac{w_1 w_2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} & L_2 + \frac{w_2^2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}.$$

При условии подключения уравнений электрического равновесия внешних цепей дифференциальное уравнение (8), отражающее электромагнитные процессы в рассматриваемом трансформаторе, становится разрешимым. Этому уравнению соответствует схема замещения (рис. 2) с нелинейными индуктивностями и взаимными индуктивностями, учитывающими степень насыщения магнитопровода по кривой намагничивания.

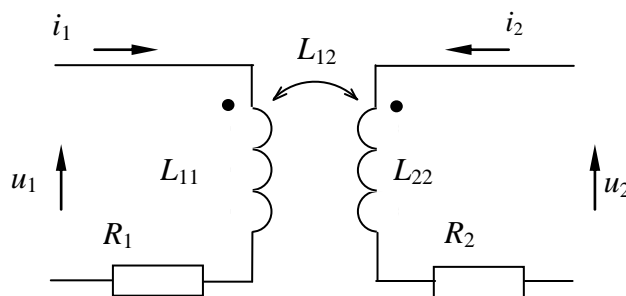


Рис. 2. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Параметры схемы замещения (рис. 2) определяются выражениями соответствующих матриц в (5) и, в том числе:

$$L_{11} = L_1 + \frac{w_1^2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)}, L_{12} = \frac{w_1 w_2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)}, L_{22} = L_2 + \frac{w_2^2 S}{\beta \alpha l \cosh(\beta b)} \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение (8) имеет нелинейные коэффициенты, его интегрирование предусматривает последовательное определение сначала напряжённости h по третьему уравнению (1), затем индукции b с применением обратной гиперболической функции и функции **sign** определения знака величины

$$b = \frac{1}{\beta} \operatorname{arcsinh}\left(\frac{h}{\alpha}\right) = \frac{\operatorname{sign}(h)}{\beta} \ln\left(\frac{|h|}{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{|h|}{\alpha}\right)^2 + 1}\right), \quad (10)$$

далее вычисления и обращения матрицы L и получения величин правых частей уравнения

$$\frac{d}{dt} I = L^{-1}(U - RI) \quad (11)$$

Схема рис. 3 легко встраивается в общую схему замещения устройства. К её зажимам могут подключаться любые элементы цепей и, в том числе, силовые вентили. Первичная и вторичная цепи оказываются гальванически развязаны так же, как в принципиальной схеме.

Проверка достоверности этой модели на характерном примере однополупериодного выпрямителя с трансформатором, параметры которого приводились ранее. Воспроизведение процесса с глубоким постоянным подмагничиванием показало (рис. 3), что принятая аппроксимация не приводит к затруднениям при численном интегрировании. Расчётная диаграмма первичного тока в этом процессе совпадает в пределах точности определения исходных данных с экспериментальной кривой первичного тока в переходном процессе переключения трансформатора с режима холостого хода на режим однополупериодного выпрямления.

Насыщение можно исключить из рассмотрения, задавшись некоторой постоянной величиной магнитной проницаемости μ . Тогда выражения индуктивностей, отражающих электромагнитное взаимодействие обмоток, принимают привычный вид

$$L_{11} = L_1 + \frac{w_1^2 S \mu}{l}, L_{12} = \frac{w_1 w_2 S \mu}{l}, L_{22} = L_2 + \frac{w_2^2 S \mu}{l} \quad (12)$$

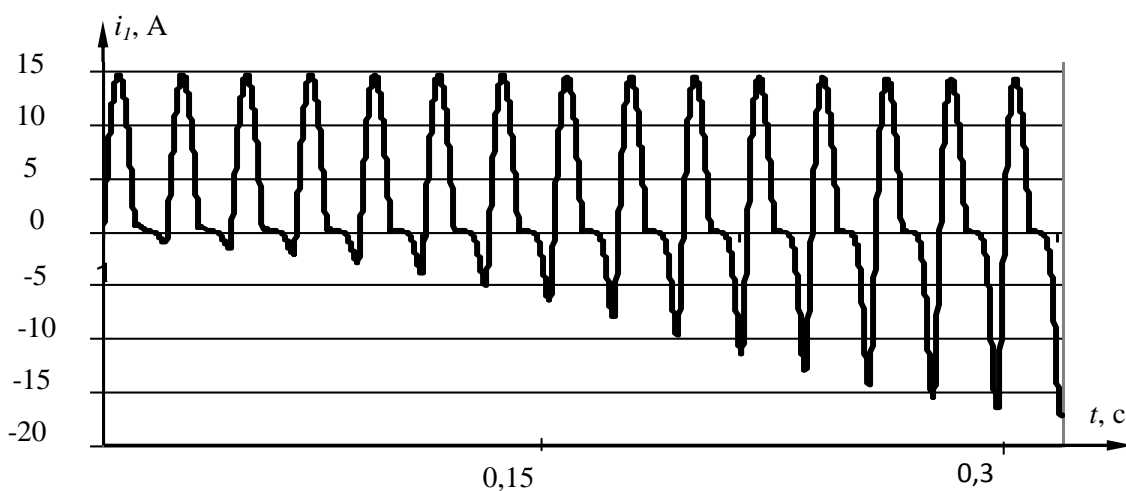


Рис. 3. Расчётная диаграмма первичного тока при включении однополупериодного выпрямления

Практический интерес имеет представление наиболее распространённых трёхфазных трансформаторов. Рассмотрим в качестве примера широко применяемый трёхфазный стержневой трансформатор с соединением обмоток “звезда-звезда“, у которого уравнения электрического равновесия фазных обмоток имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 &= W_1 \frac{d}{dt} \Phi + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} I_1 + R_{1e} I_1, \\ U_2 &= W_2 \frac{d}{dt} \Phi + L_{2\sigma} \frac{d}{dt} I_2 + R_{2e} I_2 \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \end{bmatrix}, U_2 = \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \end{bmatrix}, I_1 = \begin{bmatrix} i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} i_{21} \\ i_{22} \\ i_{23} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix}, W_1 = \begin{bmatrix} w_{11} & 0 & 0 \\ 0 & w_{12} & 0 \\ 0 & 0 & w_{13} \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} w_{21} & 0 & 0 \\ 0 & w_{22} & 0 \\ 0 & 0 & w_{23} \end{bmatrix},$$

При обозначении векторов и матриц первый индекс соответствует стороне трансформатора (первичная, вторичная), а второй – фазе или стержню. Влияние магнитных полей рассеяния учитывается приближённо, как и в предыдущем случае однофазного трансформатора: индуктивности короткого замыкания делятся между первичными и вторичными обмотками с учётом коэффициента трансформации. Они представляются диагональными матрицами индуктивностей рассеяния $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$, как и матрицы эквивалентных активных сопротивлений обмоток R_{1e} и R_{2e} , приведённые к числам витков соответствующих обмоток.

Для разрешения исходных уравнений (13) относительно напряжений на зажимах обмоток и независимых переменных применяется метод контурных токов. Выбираются независимые контура, представляемые матрицами

$$H_{e1} = H_{e2} = H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

т.е. токи первой и второй фаз составляют вектора контурных токов I_{1h} и I_{2h} . Через них с использованием транспонированных матриц независимых контуров выражаются вектора токов обмоток

$$I_1 = H' I_{1h}, I_2 = H' I_{2h}. \quad (15)$$

Уравнения (13) умножаются на матрицы независимых контуров, и с учётом (15) получаются контурные уравнения относительно линейных внешних напряжений U_{1X} и U_{2X} на зажимах обмоток

$$\begin{aligned} HW_1 \frac{d}{dt} \Phi + L_{1\sigma h} \frac{d}{dt} I_{1h} + R_{1h} I_{1h} &= U_{1X}, \\ HW_2 \frac{d}{dt} \Phi + L_{2\sigma h} \frac{d}{dt} I_{2h} + R_{2h} I_{2h} &= U_{2X}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $L_{1\sigma h} = HL_{1\sigma}H'$, $R_{1h} = HR_1H'$, $L_{2\sigma h} = HL_{2\sigma}H'$, $R_{2h} = HR_2H'$ - контурные индуктивности и активные сопротивления.

Напряженности магнитного поля в стержнях и токи обмоток связываются, согласно обходам магнитных контуров, по закону полного тока:

$$H_{cc} L_{cc} H_{\mu} = H_{cc} (W_1 I_1 + W_2 I_2), \quad (17)$$

где $H_{cc} = H$ - матрица магнитных контуров трёхстержневого трансформатора,

$L_{cc} = \begin{bmatrix} L_{cc.1} & 0 & 0 \\ 0 & L_{cc.2} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc.3} \end{bmatrix}$ - диагональная матрица длин силовых линий стержней; H_{μ} - вектор напряженностей магнитного поля стержней. Следует отметить, что в данном случае совпа-

дают конфигурации электрических схем обмоток и магнитной цепи трансформатора, что обеспечивает соответствие размеров векторов и матриц. При различиях в топологии этих схем потребуется ряд дополнительных матричных преобразований.

При дифференцировании уравнения полного тока (17) оказываются связаны производные напряжённостей и токов обмоток

$$HL_{cc} \frac{d}{dt} H_{\mu} = HW_1 \frac{d}{dt} I_1 + HW_2 \frac{d}{dt} I_2 \quad (18)$$

Для выражения взаимозависимости производных магнитных потоков стержней и токов обмоток в контурных уравнениях (18) следует перейти от производных напряжённостей к производным индукций и затем магнитных потоков. Это выполняется с использованием понятия дифференциальной магнитной проницаемости μ_{δ} [2]:

$$\mu_a = \frac{b}{h}, \mu_{\delta} = \frac{db}{dh}, \frac{dh}{dt} = \frac{1}{\mu_{\delta}} \frac{db}{dt} \quad (19)$$

Магнитные потоки стержней

$$\Phi = S_{cc} B_{\mu} \quad (20)$$

$$S_{cc} = \begin{bmatrix} S_{cc,1} & 0 & 0 \\ 0 & S_{cc,2} & 0 \\ 0 & 0 & S_{cc,3} \end{bmatrix}$$

где S_{cc} - диагональная матрица площадей поперечных сечений стержней; B_{μ} - вектор индукций стержней.

Магнитные потоки выражаются через контурные потоки

$$\Phi = H' \Phi_h \quad (21)$$

Из (18) с учётом (15, 19, 20, 21) получается соотношение, связывающее производные потоков стержней и контурных токов обмоток

$$\frac{d}{dt} \Phi = H' \frac{d}{dt} \Phi_h = H' R_{\delta h}^{-1} \left(HW_1 H' \frac{d}{dt} I_{1h} + HW_2 H' \frac{d}{dt} I_{2h} \right) \quad (22)$$

$$R_{\delta h} = H \begin{bmatrix} \frac{l_{cc1}}{S_1 \mu_{\delta 1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_{cc2}}{S_2 \mu_{\delta 1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_{cc3}}{S_3 \mu_{\delta 3}} \end{bmatrix} H'$$

где $R_{\delta h}$ - матрица контурных дифференциальных магнитных сопротивлений стержней.

С учётом (22) уравнения (16) преобразуются к виду

$$L_{T\delta.h} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{1h} \\ I_{2h} \end{bmatrix} + R_{Th} \begin{bmatrix} I_{1h} \\ I_{2h} \end{bmatrix} = U_{Xh}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} L_{1k\delta.h} &= L_{1kh} + HW_1 H' R_{\delta h}^{-1} HW_1 H', \quad L_{12k\delta.h} = HW_2 H' R_{\delta h}^{-1} HW_1 H', \\ L_{1k\delta.h} &= L_{2kh} - HW_2 H' R_{\delta h}^{-1} HW_2 H' \\ L_{T\delta.h} &= \begin{bmatrix} L_{1\delta.h} & L_{12\delta.h} \\ L_{12\delta.h} & L_{2\delta.h} \end{bmatrix}, \quad R_{Th} = \begin{bmatrix} R_{1h} & 0 \\ 0 & R_{2h} \end{bmatrix}, \quad U_{Xh} = \begin{bmatrix} U_{1X} \\ U_{2X} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Уравнению (16) трансформатора соответствует схема замещения, представленная на рис.4. Параметры на приведённой схеме определяются дифференциальной магнитной проницаемостью материала и геометрическими размерами стержней, числами витков обмоток и

данными опыта короткого замыкания обмоток трансформатора. Во многих переходных и аварийных режимах работы стержни магнитопровода трансформатора насыщаются и магнитные проницаемости, а соответственно и матрицы индуктивностей в (19) в отдельный момент времени следует считать зависящими от магнитного состояния каждого из стержней. Это состояние определяется либо напряжённостью, либо индукцией в стержне. При условии пренебрежения гистерезисом одна из этих величин однозначно выражается через другую.

Особенностью схемы замещения трёхфазного трансформатора (рис. 4) является возможность её применения для анализа силовых схем с гальванически не связанными частями – подсхемами. При совместном рассмотрении подсхем удаётся осуществлять расчёт сложной многоконтурной схемы без приведения токов и напряжений силовых цепей к одному общему уровню.

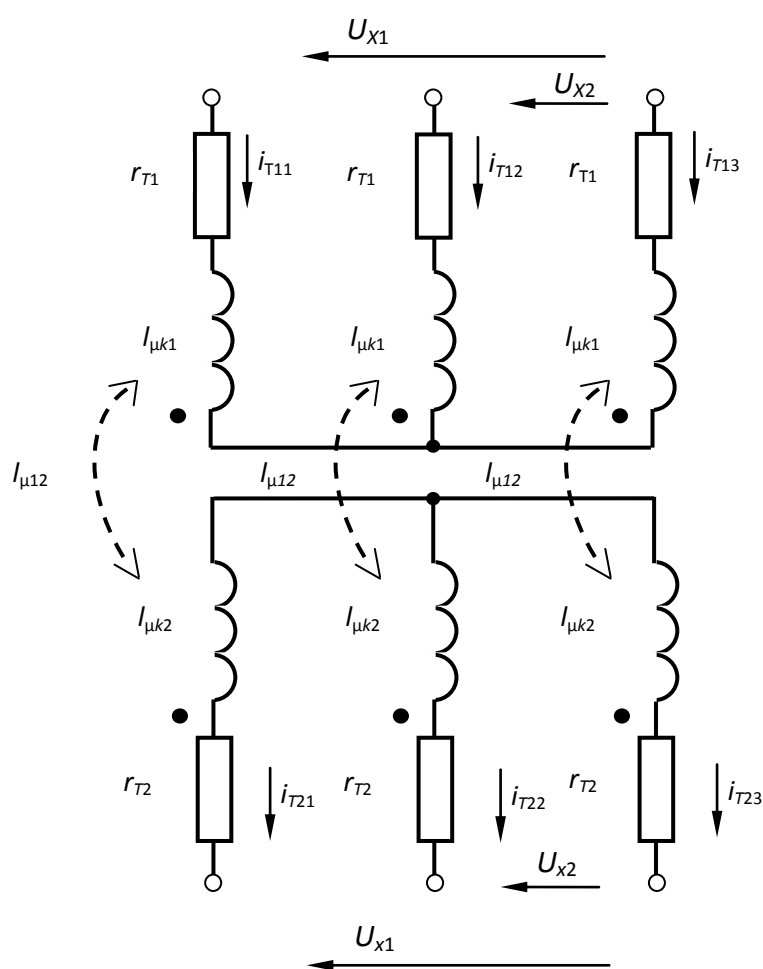


Рис. 4. Схема замещения трёхфазного стержневого трансформатора

В некоторых случаях не возникает необходимости в детальном анализе процессов на одной из сторон силового трансформатора. Тогда удобно исключить из рассмотрения эту сторону с соответствующим эквивалентным изменением структуры и параметров остающейся стороны. Осложнения возникают при анализе схем с многообмоточными трансформаторами, когда приходится учитывать распределение влияния исключаемых цепей на остающиеся цепи.

В качестве подобного примера взят многообмоточный трансформатор выпрямительно-инверторного преобразователя ВИП-2200 магистрального электровоза переменного тока [3]. Упрощенная схема силовых цепей одного из четырёх ВИПов, работающих симметрично и питаемых одним из двух трансформаторов, установленных на электровозе, представлена на рис. 5.

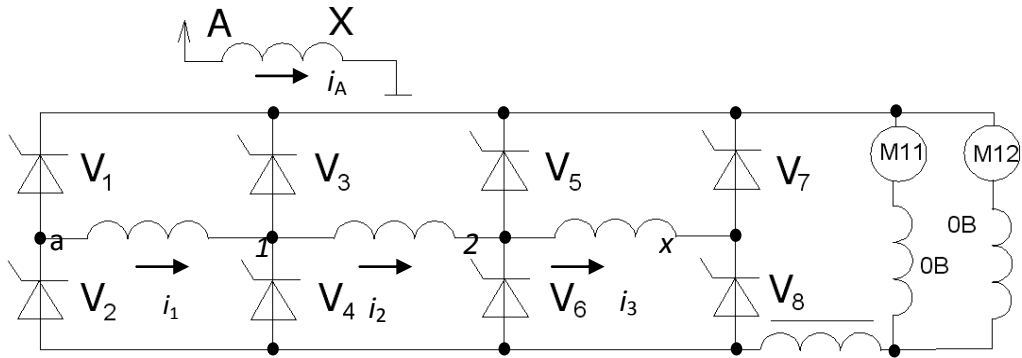


Рис. 5. Упрощенная схема силовых цепей ВИП-2200

Уравнения электрического равновесия пары обмоток: первичной $A-X$ и первой секции вторичной $a-1$, аналогичные (1), будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} u_{AX} &= w_A S \frac{db}{dt} + L_{A\sigma} \frac{di_A}{dt} + L_{A1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_{A2\sigma} \frac{di_2}{dt} + L_{A3\sigma} \frac{di_3}{dt} + R_A i_A, \\ u_{a1} &= w_1 S \frac{db}{dt} + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_{1A\sigma} \frac{di_A}{dt} + L_{12\sigma} \frac{di_2}{dt} + L_{13\sigma} \frac{di_3}{dt} + R_1 i_1, \\ &\dots \\ hl &= w_A i_A + w_1 i_1 + w_2 i_2 + w_3 i_3, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где S, l, w_A, w_1, w_2, w_3 – площадь сечения и длина средней силовой линии магнитопровода и числа витков отдельных обмоток; $L_{A\sigma}, L_{A1\sigma}$ – индуктивности и взаимоиндуктивности по потоку рассеяния; R_A, R_1 – активные сопротивления обмоток; b, h – индукция и напряжённость магнитного поля в сердечнике; $u_{AX}, u_{a1}, i_A, i_1, i_2, i_3$ – напряжения на зажимах и токи обмоток.

При пренебрежении намагничивающим током выполняется следующее соотношение между токами первичной обмотки и токами секций вторичной обмотки

$$hl = w_A i_A + w_1 i_1 + w_2 i_2 + w_3 i_3 = 0.$$

Ток первичной обмотки выражается через токи секций вторичной обмотки

$$i_A = -\frac{w_1}{w_A} i_1 - \frac{w_2}{w_A} i_2 - \frac{w_3}{w_A} i_3. \quad (25)$$

Из уравнений электрического равновесия первой и последующих секций вторичной обмотки вычитается с учётом коэффициента трансформации уравнение первичной обмотки, в результате чего исключается ЭДС индукции по потоку намагничивания. С учётом (21) после ряда группировок и преобразований получаются уравнения

$$\begin{aligned} u_{a1} &= \frac{w_1}{w_A} u_{AX} + L_{1e} \frac{di_1}{dt} + L_{12e} \frac{di_2}{dt} + L_{13e} \frac{di_3}{dt} + R_{1e} i_1, \\ u_{a2} &= \frac{w_2}{w_A} u_{AX} + L_{2e} \frac{di_2}{dt} + L_{12e} \frac{di_1}{dt} + L_{13e} \frac{di_3}{dt} + R_{1e} i_1, \\ u_{a3} &= \frac{w_3}{w_A} u_{AX} + L_{3e} \frac{di_3}{dt} + L_{12e} \frac{di_1}{dt} + L_{13e} \frac{di_2}{dt} + R_{1e} i_1, \end{aligned} \quad (26)$$

которым соответствует схема замещения (рис. 6).

С принятием некоторых допущений, связанных в основном с отсутствием данных по опытам коротких замыканий некоторых частей обмоток трансформатора (табл. 1), получены выражения и численные значения параметров схемы замещения (рис. 6), приведённые в табл. 2. Здесь выполнено приведение параметров четырёх одинаковых цепей тяговых двигателей, питаемых от одного трансформатора ОДЦ7-5000/25, к одной цепи, эквивалентной по мощности. В схеме (рис. 6) функция u_{AX} изменения напряжения на зажимах первичной обмотки считается известной, т.е. напряжение в контактном проводе должно быть задано.

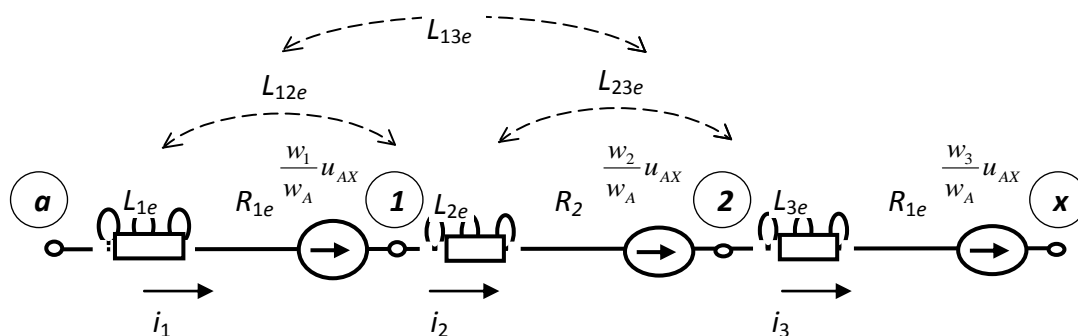


Рис. 6. Схема замещения вторичной стороны многообмоточного трансформатора

Таблица 1

Данные опытов короткого замыкания трансформатора ОДЦ7-5000/25

Питаемые обмотки	Замыкаемые секции	Выражения для приведённых индуктивностей	Индуктивности к.з., мГн	Активные сопротивления к.з., мОм
A-X	(a-1),(a-1)'	$\frac{w_1^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_A} L_{A1\sigma} + L_{1\sigma}$	$L'_{кз_A-1} = 0,024$	1,25
A-X	(1-2),(1-2)'	$\frac{w_2^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_2}{w_A} L_{A2\sigma} + L_{2\sigma}$	$L'_{кз_A-2} = 0,024$	1,25
A-X	(2-x),(2-x)'	$\frac{w_3^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_A} L_{A3\sigma} + L_{3\sigma}$	$L'_{кз_A-3} = 0,042$	2,74
(a-1),(a-1)'	(1-2),(1-2)'	$L_{1\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_2} L_{12\sigma} + \frac{w_1^2}{w_2^2} L_{2\sigma}$	$L'_{кз_1-2} = 0,021$	1,42
(a-1),(a-1)'	(2-x),(2-x)'	$L_{1\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_2} L_{13\sigma} + \frac{w_1^2}{w_3^2} L_{3\sigma}$	$L'_{кз_1-3} = 0,036$	2,00
(1-2),(1-2)'	(2-x),(2-x)'	$L_{2\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_2} L_{23\sigma} + \frac{w_2^2}{w_3^2} L_{3\sigma}$	$L'_{кз_2-3} = 0,036$	2,00

Таблица 2

Параметры схемы замещения трансформатора ОДЦ7-5000/25

Параметр	Выражение	Значение
L_1	$\frac{w_1^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_A} L_{1A\sigma} + L_{1\sigma} = L''_{кз_A-1}$	0.024 мГн
L_{12}	$\frac{1}{2} \left(L_{12\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_A} L_{A2\sigma} + L_{12\sigma} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{w_1 w_2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_2}{w_A} L_{1A\sigma} + \frac{w_1 w_2}{w_A^2} L_{A\sigma} \right) =$ $= \frac{1}{2} (L'_{кз_1-2}) + \frac{1}{2} \frac{w_1}{w_2} (L''_{кз_A-2})$	0.022 мГн
L_{13}	$\frac{1}{2} \left(L_{13\sigma} - 2 \frac{w_1}{w_A} L_{A3\sigma} + L_{13\sigma} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{w_1 w_3}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_A} L_{1A\sigma} + \frac{w_1 w_3}{w_A^2} L_{A\sigma} \right) =$ $= \frac{1}{2} (L'_{кз_1-3}) + \frac{1}{2} \frac{w_1}{w_3} (L''_{кз_A-3})$	0.029 мГн
L_2	$\frac{w_2^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_2}{w_A} L_{2A\sigma} + L_{2\sigma} = L''_{кз_A-2}$	0.024 мГн
L_{23}	$\frac{1}{2} \left(L_{23\sigma} - 2 \frac{w_2}{w_A} L_{A3\sigma} + L_{23\sigma} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{w_2 w_3}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_A} L_{2A\sigma} + \frac{w_2 w_3}{w_A^2} L_{A\sigma} \right) =$ $= \frac{1}{2} (L'_{кз_2-3}) + \frac{1}{2} \frac{w_2}{w_3} (L''_{кз_A-3})$	0.029 мГн
L_3	$\frac{w_3^2}{w_A^2} L_{A\sigma} - 2 \frac{w_3}{w_A} L_{3A\sigma} + L_{3\sigma} = L''_{кз_A-3}$	0.042 мГн
R_1	$R''_{кз_A-1}$	1.25 мОм
R_2	$R''_{кз_A-2}$	1.25 мОм
R_3	$R''_{кз_A-3}$	1.42 мОм

Приведённые характерные примеры вывода математических описаний и схем замещения трансформаторов могут быть применены при анализе различных силовых схем электроприводов. Они позволяют учесть влияние процессов функционирования трансформаторов с различной степенью детализации и, в то же время, совместимы по токам и напряжениям на зажимах с математическими представлениями других элементов силового оборудования.

Библиографический список

1. **Лейтес, Л.В.** Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия, 1974.
2. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А.Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

3. **Бочаров, В.И.** Магистральные электровозы переменного тока / В.И. Бочаров, В.И. Попов, Б.А. Гушканов. – М.: Транспорт, 1976.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2013*

A.I. Bayakov

**MATHEMATICAL MODELS OF TRANSFORMERS
WHEN ANALYZING POWER PART OF ELECTRIC DRIVES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: the mathematical description and equivalent circuit transformers for specific cases modeling of the power part of the actuator are presented.

Methods: the possible saturation of the magnetic circuits is considered with the use of analytical approximation of magnetization curves, matrix analysis multi-loop electrical and magnetic circuits is applied.

Finding (Results): the output options for differential equations simulating currents and voltage together with a magnetic flux in the core of single-phase two-windings transformer are considered. The expressions are obtained for the nonlinear own and mutual inductances of windings of equivalent circuit in three-phase the transformer. An example of the equivalent circuit output of a powerful single-phase multi-winding transformer is given according to the experiments of short circuits pair windings usings mutual inductance.

Application: the analysis of quality indicators of electric drives performarnce is provided by power schemes mathematical simulation.

Key words: mathematical modeling, transformer, equivalent circuit, the magnetization curve, analytical approximation.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74

Ю.И. Трифонов, В.А. Героцкий, Т.Д. Курилина

СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ЖИДКОПОДВИЖНЫМ ОПОРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

В производственных условиях апробирован способ повышения прочности, газопроницаемости и геометрической точности оболочковых форм, получаемых по выплавляемым моделям.

Для этого форма вместе с опорным наполнителем помещается в электровакуумную печь для вытопки модельной массы и прокалики формы. Использование низкого вакуума позволяет снизить температуру прокалики формы. Применение жидкоподвижного опорного наполнителя и низкого вакуума при вытопке модельной массы и прокалики формы оказывает положительное влияние на качество формы.

Ключевые слова: оболочковая форма, жидкоподвижный опорный наполнитель, вакуум, температура прокалики, прочность и газопроницаемость опорных наполнителей, качество формы.

Современные модельные составы в литейном производстве изготавливают из комбинаций восков (парафино-стеариновая смесь, природные твердые воски) с добавлением пластмасс (полиэтилен, поливинилбутилацетат, бутадиенстирол, этилцеллюлоза) [1]. При литье по выплавляемым моделям крупных тонкостенных отливок с повышенной геометрической точностью, традиционные парафино-стеариновые модельные составы не удовлетворяют необходимым требованиям.

Модели из таких составов недостаточно прочны, размягчаются при $30\div 35^{\circ}\text{C}$, что в процессе технологических операций приводит к искажению форм и нарушению точности геометрических размеров отливок.

Необходимым свойством обладают традиционные парафино-стеариновые модельные составы со специальными наполнителями, повышающими прочность и термостойкость моделей. При этом желательно, получать стабильные свойства моделей при изготовлении их (моделей) на прессе с усилием 10-15 т.

Прочность таких модельных составов в $4\div 5$ раз выше, чем традиционных.

Однако прочные модельные составы требуют и более высоких температур, (по сравнению с парафино-стеариновыми) при удалении моделей из оболочек.

Удаление из форм модельного состава производится различными способами, отличающимися техническим исполнением и долей безвозвратных потерь модельных композиций. Наиболее известны [1] способы, указанные в табл. 1.

Удаление моделей низкотемпературным нагревом при очевидных достоинствах имеет ряд существенных недостатков. Наименее рекомендуемым можно считать выплавление горячим воздухом, при котором из-за медленного прогрева модели и быстрого нагревания оболочки в последней происходит образование трещин [2]. Проникающий в оболочку модельный состав впоследствии необходимо выжигать при прокаливании.

Использование жесткой воды при вытапливании модельного состава в горячей ванне способствует его омылению, образованию нерастворимых в воде продуктов, которые накапливаются в модельных составах и служат источником засоров в отливках.

Таблица 1

Способы выплавления модельного состава

Способ	Оборудование	Температурный режим, °С	Потери, %	Примечание
Высокотемпературный нагрев	Термические печи	900-1100	10-15	Снимается необходимость прокалики
Низкотемпературный нагрев	Ванны с кипятком	90-100	2-5	
Нагрев при высоком давлении	Автоклавы	135-165 при давлении 3-6 атм.	2-5	

Наиболее успешным способом выплавления моделей является применение в качестве среды расплава применяемого модельного состава. Имеется мнение [2], что прочность прокаленных оболочек возрастает за счет скоксовавшихся остатков модельного состава. Это же явление способствует улучшению условий заливки, затвердевания и охлаждения отливки и предупреждению образования в них обезуглероженного слоя.

Способ изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям [3], включающий образование многослойной формы из керамической суспензии на этилсиликатном связующем, предусматривает выплавление модели при воздействии по оболочку горячим воздухом и прокалику оболочки, отличающиеся тем, что, с целью улучшения качества форм за счет устранения трещин при выплавлении модели в горячем воздухе, горячий воздух подают со скоростью 10 - 20 м/с и одновременно с ним на модель воздействуют сухим насыщенным водяным паром в течение 2 - 20 мин, который после выплавления модели удаляют.

Перспективным считается использование СВЧ нагрева для удаления моделей [4].

Для удаления высокопрочных модельных составов применяют высокотемпературный нагрев. В результате под воздействием более высоких температур возникают и более высокие напряжения в оболочке, что приводит, как правило, или к частичному разрушению ее или короблению, и, в конечном итоге, к нарушению геометрической точности полости литейной формы, а, следовательно, отливки.

Чтобы исключить такие явления, необходимо упрочнение оболочки с помощью внешней опоры осуществлять до удаления из нее модели, а не после, как это практикуется при традиционном способе литья по выплавляемым моделям.

Возможность коробления и растрескивания оболочки при вытопке модельной массы и последующей прокалики требует ее упрочнения перед проведением указанных операций и упаковкой в опорную смесь. Простейшая опорная смесь – сухой песок. Однако хотя песок уменьшает термические напряжения в оболочке при прокалке, невозможно при действующей технологии использовать засыпку оболочек песком перед вытопкой моделей. Соответственно прорабатывались разные варианты опорных смесей применительно к цеховым условиям.

Известен способ с применением влажного наполнителя, состоящего из 88-90% кварцевого песка и 10-12% глиноземного цемента марки 400-500. После перемешивания 4-5 мин в сухом состоянии в смесь добавляют 30-35% воды. После перемешивания образующуюся суспензию (раствор) заливают в контейнер, в котором предварительно установлена модель с нанесенной на ее оболочкой (причем допускается, чтобы количество слоев уменьшилось с 4-5 до 2-3). Через 5-10 мин суспензия (раствор) твердеет. Для более плотного обтекания суспензией модели, целесообразно заливку осуществлять на вибрационном столе. Недостатком такой технологии является низкая газопроницаемость полученной формы, что нежелательно при изготовлении тонкостенных отливок с развитой поверхностью. Для полного от-

верждения суспензии и частичного удаления влаги форма выдерживается на воздухе 16-20 ч и затем помещается в печь для вытопки модели с последующей прокалкой в течение 12-16 ч.

Новая технология заключается в использовании в качестве влажного наполнителя для заливки оболочек жидкоподвижных композиций. Высокая текучесть таких композиций позволяет отказаться от уплотнения на вибростоле. Но главное заключается в том, что газопроницаемость формы после отверждения и выдержки достигает 400 и более единиц. Соответственно улучшаются условия прокалки и заливки форм.

Рекомендуемые составы жидкоподвижных композиций приведены в табл. 2. Так как все они на практике дают близкие результаты, в зависимости от наличия материалов можно использовать любую из композиций.

Таблица 2

Состав смесей для заливки оболочковых форм

Смесь	Формовочный песок	Связка	Пенообразователь	Отвердитель	Добавки
Фосфатная	IK02 IK0315 100%	Алюмо-фосфатная, 7-8%	ДС-РАС 0,15÷0,20%	-	Вода до 5-6% Цемент 0-3%
Жидко-стекольная	-	Жидкое стекло 6-7%	ДС-РАС 0,15-0,20%	Ферро-хромой шлак 0-4%	Вода до 5-6%
Цементная	-	Цемент марки 400-500 7-8%	Концентрат бражки и жидкий (КБЖ) 9÷11%	-	Хлористое железо 0,2÷3,3%

Для приготовления композиций удобно использовать доступные установки для приготовления строительных растворов и бетонов емкостью 25-30 литров. Подготовленная оболочка помещается в опоку и заливается свежеприготовленной жидкоподвижной композицией.

Для приобретения прочности $0,5\div 0,7$ МПа ($5-7$ кгс/см²) и газопроницаемости порядка 400 единиц, форма выдерживается на воздухе 24 ч. Затем осуществляется прокалка форм с одновременным выплавлением моделей.

Прокалка форм – важная принципиальная операция, определяющая в значительной степени качество и себестоимость отливок. В данной технологии обычная температура прокалики оболочек до 950° трудно осуществима, так как в процессе участвуют опоки, которые при такой температуре будут чрезмерно окисляться и коробиться.

Кроме того, смеси на жидком стекле, при их использовании в формах, при температуре 700-750 °С теряют прочность, что проявится при следующей операции заливки форм.

Обычно режимы прокаливания выбирают с учетом разновидности форм и свойств входящих в их состав материалов [4]. Однако минимальная температура нагрева для удаления органических остатков модельного состава и этилсиликатного связующего во всех случаях составляет 850-950 °С. Исключением является прокалка в вакууме и в высокотемпературном псевдооживленном слое огнеупорного материала, когда процессы возгонки, деструкции или окисления удаляемых веществ протекают более интенсивно. При этом возможно некоторое понижение температуры прокалки. Например, при литье деталей из алюминиевых сплавов в кварцевые формы применение прокаливания в вакууме или псевдооживленном слое горячего песка ограничивается нагревом оболочек до 500-550 °С. Таким образом, не достигается температура полиморфного превращения песка и исключается опасность растрескивания оболочек.

Снизить температуру прокалики форм можно за счет использования низкого вакуума до 1-10 мм рт. ст. На рис. 1 показана схема электровakuумной печи для прокалики форм. Форма 2 помещается на решетку печи 4 и осуществляется нагрев до 500-550°C. Плавящая модельная масса стекает в приемник 6. После 1-3-часовой выдержки герметизируется крышка 1 и отверстие внизу печи закрывается пробкой 8. Включается через ниппель 7 вакуум и осуществляется часовая выдержка под вакуумом. Такая выдержка равноценна прокалике при 900-950°C.

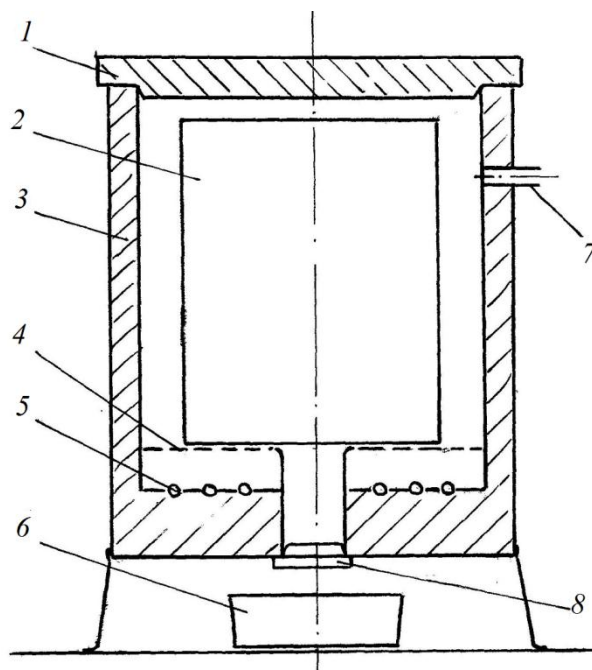


Рис. 1 Электровakuумная печь для прокалики форм:

1 – крышка; 2 – литейная форма;
3 – корпус печи; 4 – решетка; 5 – нагреватель;
6 – приемная чаша для модельного состава; 7 – ниппель вакуумпровода; 8 – пробка

Таким образом, с помощью заливки оболочковых форм, полученных по выплавляемым моделям, жидкоподвижными смесями возможна эффективная организация получения тонкостенных прецизионных отливок из алюминиевых сплавов при умеренных затратах [5].

В качестве варианта основы опорных смесей были выбраны применяющиеся в цехе гипсовые смеси, включающие 60% гипса, 32% песка, 2% асбеста и 6% слюды. Для повышения технологичности в цеховую смесь вводили различные добавки.

С целью увеличения жидкоподвижности в жидкую гипсовую смесь вводили 0,2-0,3% ПАВ ОП-7. Эта добавка несколько уменьшала количество воды в смеси, но все же влажность смеси оставалась высокой и составляла 40-45%. Образцы прокаливали при 500, 600, 700 и 800°C с выдержкой 1 ч. Прочность при 500 °C оставалась практически как у исходного образца, затем по мере роста температуры прокалики падала и оказалась для 800 °C низкой.

Проверяли влияние различных добавок на прочность опорных смесей с гипсовым наполнителем при различных температурах прокалики (рис. 2).

Добавка этилсиликата прореагировала с ОП -7 в смеси и устранила пенообразование. В результате пришлось увеличить количество воды в смеси из-за уменьшения ее жидкотекучести. Влияние добавок на прочность смеси представлено на рис. 2.

Как видно на рис. 2, наибольшей прочностью обладает смесь с добавкой этилсиликата. Исходная смесь, обладая повышенной прочностью при низкой температуры прокалики, с повышением температуры теряет ее. Прочность смеси с добавкой жидкого стек-

ла достаточно велика в исходном состоянии, при прокатке она падает и с ростом температуры меняется мало.

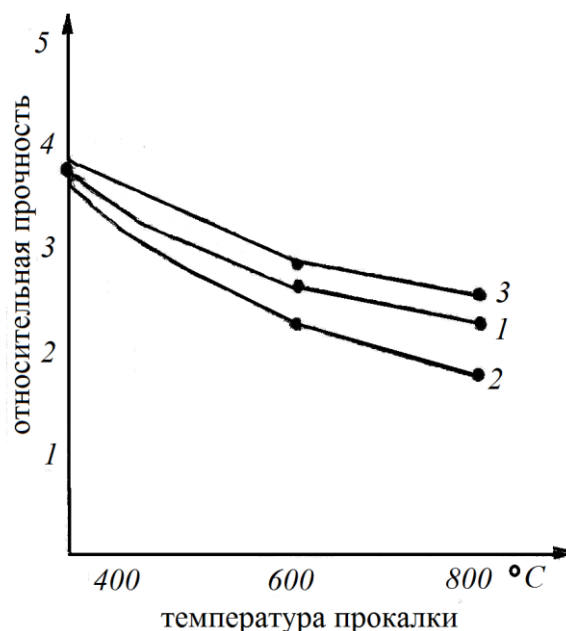


Рис. 2. Влияние температуры прокатки на прочность опорных смесей:

1 – исходная смесь: 45% гипсовой смеси, 54% воды, 1% ОП-7;

2 – добавка 4% жидкого стекла;

3 – добавка 4% негидролизованного этилсиликата

С целью предотвращения разупрочнения смеси с добавкой жидкого стекла при прокатке в состав смеси ввели 1% борной кислоты. В результате, как показали эксперименты, при прокатке прочность смеси практически не изменялась и осталась на уровне исходной.

Недостаток гипсовых смесей – значительное содержание воды (до 60%). С целью уменьшения содержания воды и колебания размеров при отверждении и прокатке смеси использовали следующий состав: 1 часть гипсовой смеси, 2 части песка, 0,5 части цемента и добавка 0,5% ОП-7 в жидкую композицию. Данный состав показал значительную прочность после отверждения. После прокатки при 700-750°C прочность падала, но оставаясь достаточной для технологических целей.

Анализ показывает, что идеальной опорной смесью может служить пористая масса или затвердевшая пена. Такая пена может быть получена в результате выделения газа в процессе отверждения смеси, например, по реакции алюминиевого порошка с ортофосфорной кислотой.

По данной реакции одновременно выделяется водород и трехзамещенный алюмофосфат, который служит алюмофосфатной связкой в смеси. В экспериментах использовали цеховую суспензию на гидролизованном этилсиликате с добавками до 10-25% алюминиевого порошка и 5-10% ортофосфорной кислоты. После смешивания начиналась реакция с выделением водорода, масса вспенилась и через сутки затвердела в виде достаточно прочной твердой «губки» с размером ячеек 1-5 мм.

Выводы

Использование в процессе изготовления оболочковой формы в качестве опорного наполнителя жидкоподвижной смеси способствует повышению физико-механических свойств и качества формы.

В качестве технологии выплавления модельного состава и последующей прокатки

может использоваться электровакуумный нагрев, обеспечивающий снижение температуры прокали и, следовательно, являющийся более энергоэффективным, чем традиционные режимы подготовки оболочковой формы к заливке. Уменьшение температуры также повышает прочность, геометрическую точность и газопроницаемость формы.

Библиографический список

1. **Вагин Г.Я.** Ресурс- и энергосбережение в литейном производстве: учебник для вузов / Г.Я. Вагин, В.А. Коровин, И.О. Леушин, А.Б. Лоскутов; Нижегород. гос. тех. ун-т. – Н. Новгород, 2008. – 211 с.
2. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Л.И. Шкеленника и В.А.Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 404 с.
3. А.с. SU 1141643 А1 Способ изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям.
4. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
5. **Трифонов, И.Ю.** Опыт получения тонкостенных корпусных отливок из алюминиевых сплавов по выплавляемым моделям // Литейное производство сегодня и завтра: тр. 8-й научно-практической конференции. – СПб., 2010.

*Дата поступления
в редакцию 21.11.2013*

Y.I. Triaonov, V.A. Gerotsky, T.D. Kurilina

METHOD OF HARDENING OF THE SHELL MOLD BY THE FLUID BEARING FILLER

Purpose: When investment casting of large thin-walled castings with high geometric precision, traditional paraffin-stearic model formulations do not meet the necessary requirements. Purpose - to find a way of hardening shell molds.

Design/methodology/approach: Under production conditions was tested way to increase strength, permeability and geometric precision for shell molds by investment casting.

Findings: For this form, together with supporting liquid filler is placed in electrical vacuum furnace for melting out the model and calcination forms.

Research limit ations/implications: The low vacuum uses to reduce the temperature of baking forms.

Originality/value: Application liquid filler and low vacuum melting out the model and calcination mold has a positive impact on the quality of the form.

Key words: shell of mold, liquid filler, vacuum baking temperature, strength, permeability.

УДК 621. 785

Е.Г.Терещенко, В.В. Галкин, А.А. Дербенев

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА ПОСЛЕ ВЫСОКОГО ОТПУСКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дана оценка влияния режимов высокого отпуска на механические свойства, коррозионную стойкость и состояние структуры на примере коррозионностойкой стали мартенситного класса. Приведены данные о сравнении указанных характеристик после горячего прессования, высокого отпуска, а также отпуска с предварительной закалкой. Показано влияние длительности отпуска на механические свойства и размер зерна.

Ключевые слова: прессованный профиль, мартенсит, карбиды, коррозионное растрескивание, величина зерна, механические свойства.

Цель исследования

Коррозионностойкая высокопрочная сталь 08X15H5Д2Т поставляется с химическим составом, указанным в табл. 1, и принадлежит по структуре после нормализации к классу мартенситных сталей со стареющим мартенситом, при этом содержание остаточного аустенита колеблется от 2 до 10 % [1].

Таблица 1

Химический состав стали 08X15H5Д2Т

Элемент	Fe	Cr	Ni	Cu	Ti	Si	Mn	S	P	C
Содержание	Осн	13,5- 14,8	4,8- 5,8	1,75- 2,5	0,03- 0,15	≤ 0,7	≤ 1,0	≤ 0,018	≤ 0,02	≤ 0,08

Из этой стали изготавливаются многообразные полуфабрикаты – листы, ленты, прокат, поковки, штамповки, которые применяются для изготовления сложонапряженных деталей различного назначения, в основном в авиастроении, в том числе для элементов герметичных емкостей. В соответствии с требованиями чертежей и в зависимости от условий эксплуатации упрочняющая термическая обработка выполняется по двум основным схемам:

1. Закалка + старение. Эта схема обеспечивает предел прочности:

$$\sigma_{\text{в}} = 115 \dots 135 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (1128} \dots \text{1324 МПа);}$$

2. Закалка + высокий отпуск для обеспечения предела прочности:

$$\sigma_{\text{в}} = 90 \dots 100 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (883} \dots \text{981 МПа).}$$

Обрабатываемость резанием упрочненных полуфабрикатов затруднена, поэтому перед механической обработкой они подвергаются специальному охрупчивающему отжигу при температуре 660–680°C, после которого сталь приобретает структуру, состоящую из мартенсита и многочисленных карбидов типа Cr₂₃C₆, расположенных внутри и по границам зерен.

Целью настоящей работы было сравнение механических свойств, коррозионной стойкости, а также структурных характеристик для установления возможности выбора экономно-оптимального варианта высокого отпуска, обеспечивающего заданные эксплуатационные характеристики стали, термически обработанные с пределом прочности $\sigma_{\text{в}} = 100 \pm 10 \text{ кг} \cdot \text{с/мм}^2$ (981±98 МПа).

Методика исследования

Исследование проводилось на образцах, изготовленных из унифицированного прессованного профиля мартенситно-старееющей стали 08X15H5Д2Т промышленной выплавки, имеющей химический состав, указанный в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав исследуемых образцов

Основные элементы	Cr	Ni	Cu	Ti	C
Содержание	15,5	4,95	2,1	0,13	0,07

Исходное состояние образцов – горячепрессованное, без термической обработки.

Заготовки образцов, размером 12x12x70 и 2,5x15x150, подвергались термической обработке в лабораторных печах типа СНОЛ по заданным режимам, указанным в табл. 3, после чего проводились механические испытания, металлографический анализ и определение коррозионной стойкости.

Режимы термической обработки назначались на основании требований получения заданных чертежом свойств.

Для сравнения приведены также результаты испытаний образцов в исходном состоянии, после специального охрупчивающего отпуска (670°), и после закалки с $t = 950^{\circ}\text{C}$.

Проведение исследований выполнялось по стандартным методикам:

- определение показателей механических свойств $\sigma_b, \sigma_{0,2}, \delta, \psi$ проводилось по ГОСТ 1497; КСЧ – по ГОСТ 9454, измерение твердости НВ – по ГОСТ 9012.

Микроструктура исследовалась на обломках ударных образцов.

Коррозионная стойкость определялась на образцах размером 2x15x150 по ГОСТ 9.901.2 методом коррозионного растрескивания.

Представляла также интерес количественная оценка зеренного состояния стали, которая проводилась по методике, изложенной в [2]. В настоящей работе определялась средняя площадь зерна S_{cp} .

Результаты исследования

Результаты исследований представлены в табл. 2, и на снимках микроструктур (рис. 1–4).

Из приведенных результатов табл. 2 видно, что максимальные значения предела прочности - σ_b , предела текучести - $\sigma_{0,2}$, при наименьших относительном удлинении δ , относительном сужении ψ и ударной вязкости КСЧ, – имеют место в случае, когда образцы подвергнуты закалке с $t = 950 \pm 10^{\circ}\text{C}$, когда большая часть легирующих элементов находится в твердом растворе, а структура стали - мартенсит закалки. В таком состоянии сталь не применяется.

В остальных случаях наибольшие значения предела прочности 970...995 МПа и предела текучести 864...877 МПа сталь имеет в состоянии поставки, т.е. после горячего прессования, что может быть объяснено имеющим место «пресс-эффектом», и при этом другие показатели - $\sigma_{0,2}$, δ , ψ - также высокие. Немного ниже лишь относительное удлинение и твердость НВ.

Микроструктура этих образцов - мартенсит и карбиды, расположенные как внутри, так и по границам бывшего аустенитного зерна (рис. 1).

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов после термической обработки

Номер образца	Режим термообработки	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	НВ, d отп.	КСУ, кгс/см ²
1	Отпуск 620 ⁰ С, выдержка 1 ч	917	792	20,0	66,7	3,8	17,70
		931	804	20,0	66,2	3,8	19,70
2	Отпуск 620 ⁰ С, выдержка 2 ч	893	794	20,0	67,8	3,75	19,70
		922	843	19,2	66,6	3,8	20,20
3	Отпуск 620 ⁰ С, выдержка 3 ч	907	789	20,0	66,7	3,85	17,90
		897	789	20,0	67,4	3,8	21,00
4	Отпуск 620 ⁰ С, выдержка 4 ч	907	721	20,0	69,6	3,8	18,90
		888	718	19,2	67,8	3,9	19,20
5	Закалка 950 ⁰ С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, отпуск 610 ⁰ С, выдержка 1 ч	965	867	20,0	65,0	3,6	18,60
		941	828	19,2	65,5	3,7	17,50
6	Закалка 950 ⁰ С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, отпуск 610 ⁰ С, выдержка 2 ч	882	828	20,0	65,5	3,7	19,20
		939	833	20,0	64,4	3,7	19,00
7	Закалка 950 ⁰ С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, отпуск 610 ⁰ С, выдержка 3 ч	916	811	19,2	68,0	3,75	18,50
		931	815	19,2	65,5	3,75	17,80
8	Закалка 950 ⁰ С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, отпуск 610 ⁰ С, выдержка 4 ч	936	804	18,0	66,5	3,75	17,90
		921	815	18,0	65,5	3,7	18,90
9	Отжиг 670 ⁰ С, выдержка 2 ч	911	809	20,0	69,0	3,8	19,50
		931	828	18,0	68,5	3,8	19,80
10	В исходном состоянии	970	864	16,8	68,0	3,65	15,80
		995	877	16,8	67,5	3,65	18,50
11	Закалка с 950 ⁰ С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, выдержка 30 мин	115,0	102	14,0	63,0		13,8
		115,0	103	16,0	63,5		13,0

Высокий отпуск при температуре 620⁰С без предварительной закалки, как следует из табл. 3, приводит, по сравнению с исходным состоянием, к понижению предела прочности до 888...922МПа, предела текучести до 718...843 МПа. При этом наблюдается повышение значений относительного удлинения до 19,2...20%, ударной вязкости до 17,7...21,0 кгс/см², относительного сужения 65,0...68,0 %. Объяснение этому находим в анализе микроструктуры – наблюдается заметное увеличение размеров зерен, т.е. при этих режимах

($t = 620^{\circ}\text{C}$, выдержка 1...4 ч) происходит собирательная рекристаллизация горячепрессованной стали (рис. 2).



Рис. 1. Микроструктура стали в исходном (горячепрессованном) состоянии. Увеличение $\times 340$ S_{cp} 79-84 мкм^2



Рис. 2. Микроструктура стали после отпуска при температуре 620°C без предварительной закалки. Увеличение $\times 340$ S_{cp} 109-138 мкм^2

Структура стали после отпуска 620°C – мартенсит и карбиды Cr_{23}C_6 [1], выделившиеся как внутри зерен, так и в виде сетки по границам аустенитного зерна (рис. 2).

Следует обратить внимание на то, что в этой группе образцов зерна имеют различную форму и неоднородны по размеру.

Изменение свойств можно объяснить, очевидно, процессами собирательной рекристаллизации, проходящей неодинаково и неодновременно [3].

В табл. 3 показана также некоторая зависимость свойств от времени отпуска при температуре 620°C : при увеличении длительности отпуска наблюдается небольшое уменьшение предела прочности, предела текучести при почти неизменных значениях твердости и небольшом понижении относительного удлинения. Это может быть объяснено ростом и коагуляцией карбидной фазы Cr_{23}C_6 .

Образцы, подвергнутые отпуску при температуре 610°C с предварительной закалкой,

показали более высокие по сравнению с режимами 1-4 механические свойства: $\sigma_{в} = 882-965$ МПа; $\sigma_{0,2} = 804-867$ МПа; $\delta = 18-20\%$; $\psi = 65-68\%$ КСУ=17,5-18,9 кгс/см².

Для этой группы образцов характерно более заметное изменение свойств с увеличением длительности отпуска.

Микроструктура стали в этом случае также представляет собой мартенсит и карбиды, однако зерна бывшего аустенита заметно мельче и однороднее (рис. 3).



Рис. 3. Микроструктура стали после закалки с температуры 950⁰С и отпуска при температуре 610⁰С. Увеличение $\times 340$ S_{cp} 56 мкм²

Значит, при термической обработке по этим режимам произошла полная перекристаллизация стали.

На рис. 4 показаны образцы, термически обработанные по режимам 4 и 8, испытанные на коррозионное растрескивание с последующим загибом до угла 180⁰.

Очевидно, что образцы испытание выдержали.

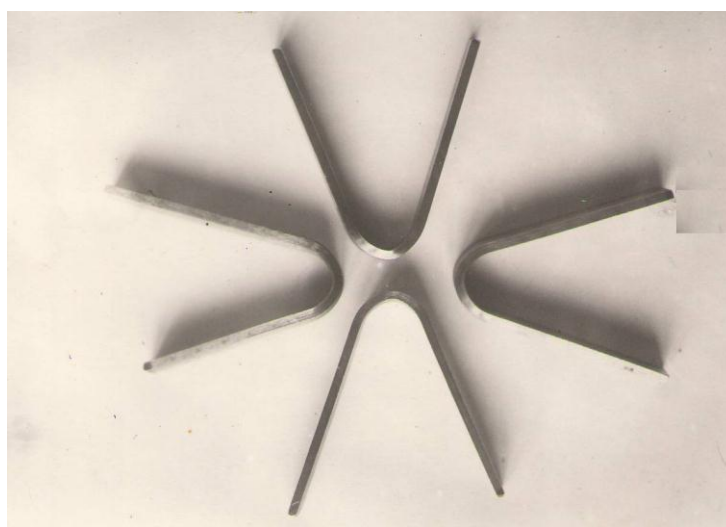


Рис. 4. Вид образцов после испытания на коррозионное растрескивание с последующим изгибом до 180⁰

Выводы

1. Проведено исследование влияния высокого отпуска на структуру, механические свойства и коррозионную стойкость коррозионностойкой высокопрочной мартенсито-старееющей стали 08X15H5Д2Т, находящейся в различных исходных состояниях.

2. Установлено, что наиболее высоким комплексом свойств обладает сталь после термической обработки по режиму: закалка 950⁰С, выдержка 30 мин, охлаждение в воде, отпуск 610⁰С, выдержка 1-2 ч, которая обеспечивает мелкозернистую микроструктуру с однородными зернами.

3. Длительность отпуска понижает прочностные характеристики за счет увеличения размеров и количества карбидной фазы Cr₂₃ C₆.

4. Образцы выдержали испытание на коррозионную стойкость.

Библиографический список

1. **Потак, Я.М.** Высокопрочные стали / Я.М. Потак. – М.: Metallurgy, 1972.
2. **Галкин, В.В.** К вопросу о построении диаграмм рекристаллизации металлов / В.В. Галкин, Е.Г. Терещенко, А.В. Кошелев, А.А. Дербенев // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №3. С. 43–46.
3. **Арзамасов, Б.Н.** Материаловедение / Б.Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

*Дата поступления
в редакцию 21.11.2013*

E. Tereshenko, V. Galkin, A. Derbenev

HIGH-STRENGTH, WEAR RESISTANCE STEEL OF THE MARTENSITIC TYPE STRUCTURE AND PROPERTIES INVESTIGATION AFTER THE HIGH TEMPERING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alexeev

Purpose: Comparison of the mechanical properties, corrosion resistance, and also structural characteristics for the establishment of a possibility of a choice of economical and optimum option of the high tempering providing set operational characteristics of steel, thermally processed with strength was the purpose of the real work $\sigma_B = 981 \pm 98$ МПа.

Design\methodology\approach: Technique Research was conducted on the samples made of the unified pressed profile of martensite-growing old steel 08X15H5Д2Т. Preparations of samples, 12x12x70 and 2,5x15x150 in size, were exposed to heat treatment in laboratory furnaces on the set modes, then mechanical tests, the metalgraphic analysis and determination of corrosion resistance were carried out.

Research limitations\implications: It was established that the highest complex of properties steel after heat treatment on a mode possesses: training 950⁰С, endurance of 30 min., cooling in water, tempering 610⁰С, endurance 60-120 min which provides a fine-grained microstructure with uniform grains. The duration of tempering is lowering the strength characteristics at the expense of increase in the sizes and quantity of the carbide phase Cr₂₃ C₆. The samples were pass the test for corrosion resistance.

Originality\value: The research of the high tempering influence to the structure of the steel, to the mechanical properties, to the size of the austenitic grain and the corrosion resistance of the corrosion-resistant high-strength steel 08X15H5Д2Т being in various initial conditions was conducted.

Key words: pressed block profile, martensite, carbons, corrosion crack formation, grain damnation, mechanical properties.

УДК 621.78.669.14.018.298

Л.П. Казанский, В.Л. Сивков, Л.М. Бистина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МАРОК 26Г2СБА И 25ХГМНТБА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследованы различные режимы термической обработки проката из сталей 26Г2СБА и 25ХГМНТБА и выбран оптимальный вариант, обеспечивающий требования МАКО¹ и Регистра РФ к якорным цепям, изготовленным из этих марок сталей.

Ключевые слова: сталь конструкционная низколегированная, термообработка – нормализация, закалка, отпуск; критические точки, структурные превращения, структура сорбитообразная после улучшения, кинетика фазовых превращений.

В настоящее время известно много исследований по закалке конструкционных сталей из межкритического интервала температур $A_{c1} - A_{c3}$ [1-3]. Такая термическая обработка позволяет в ряде случаев повысить пластические и вязкие свойства, не снижая при этом прочностные свойства сталей.

Повышение пластических и вязких характеристик при сохранении достаточно высоких прочностных свойств – основная задача при разработке режима. Термической обработки сталей 26Г2СБА и 25ХГМНТБА.

С этой целью определены критические точки A_{c3} и A_{c1} , склонность стали к росту зерна при нагреве, а также кинетика фазовых превращений переохлажденного аустенита.

Исследования проводили на образцах, изготовленных из горячекатаного металла стали 26Г2СБА (№1) и 25ХГМНТБА (№2). Критические точки определяли на цилиндрический образцах диаметром 2 мм и длиной на 20 мм методом измерения электросопротивления на потенциометре. На основании температурной зависимости электросопротивления образцов установлено, что для стали 26Г2СБА критические точки $A_{c3}=830\pm 5^\circ\text{C}$, $A_{c1}=760\pm 5^\circ\text{C}$. Для стали 25ХГМНТБА точка $A_{c3}=800\pm 5^\circ\text{C}$, $A_{c1}=740\pm 5^\circ\text{C}$.

Склонность к росту зерна аустенита изучали на стандартных образцах размером 3x3x72 мм методом высокотемпературной металлографии на установке ИМАШ-5С. Образцы нагревали электроконтактным способом до 1100°C со скоростью 20 град/мин. Кривые зависимости роста, аустенитного зерна от температуры нагрева представлены на рис. 1, где 1 - сталь 26Г2СБА, 2 - сталь 25ХГМНТБА.

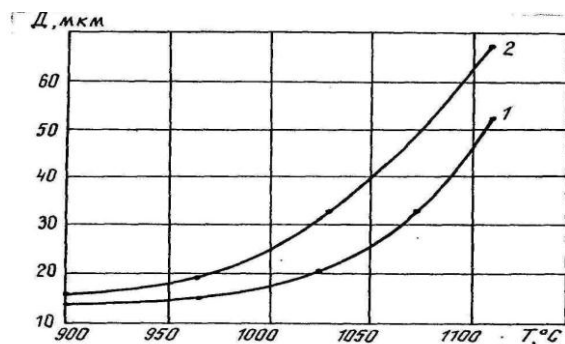


Рис. 1. Температурная зависимость роста зерна аустенита:
1, 2 – номера плавок

Из приведенной температурной зависимости размера зерна аустенита следует, что

рост зерна аустенита стали 25ХГМНТБА более интенсивный, чем стали 26Г2СБА. Однако при выборе режимов термической обработки, в частности, температуры нормализации, обе стали не следует нагревать свыше 930-950°C, так как сверх этой температуры наблюдается разноструктурность, которая оказывает отрицательное влияние на вязкость сталей.

Разработку режимов термической обработки проводили в двух направлениях: для материала II категории прочности и материала цепей III категории прочности.

С учетом высоких требований по пластическим свойствам, предъявляемым к материалу цепей II категории прочности, в основу режима заложена нормализация (Н), причем температура нормализации должна соответствовать температуре рекристаллизации для получения мелкозернистой структуры стали.

Для достижения высоких вязких характеристик был заложен высокий отпуск (О). Оптимальный режим высокого отпуска отработывали на пластинах 20x150x250 мм, вырезанных из горячекатаных квадратных заготовок сечением 130x130 мм стали 26Г2СБА.

Методика отработки режима отпуска заключалась в нагреве нормализованных пластин при температурах 570, 590, 610, 630 и 650°C (по две пластины на каждую температуру), выдержке при указанных температурах в течение 2 ч (из расчета 6 мин на 1 мм сечения) и затем последующего охлаждения одной пластины на воздухе, другой – в воде. Из термообработанных пластин вырезали по три образца для разрывных испытаний. Разрывные образцы испытывали по ГОСТ1497-93, а ударные образцы – при температуре - 40°C по ГОСТ9454-75.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены данные механических испытаний образцов стали 26Г2СБА и зависимость свойств от температуры отпуска с различным охлаждением.

Таблица 1

Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температур отпуска

№ образца	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	$\alpha_{Н1}^{-40}$, МДж/м ²
0	H ₈₆₀	636	835	21,5	60	0,28
1	H ₈₆₀ + O ₅₇₀ ; вода	517	781	22,2	65	0,446
2	H ₈₆₀ + O ₅₇₀ ; воздух	637	822	20,6	68,3	0,196
3	H ₈₆₀ + O ₅₉₀ ; вода	647	771	24,2	67,0	0,347
4	H ₈₆₀ + O ₅₉₀ ; воздух	575	763	23,8	66,3	2,10
5	H ₈₆₀ + O ₆₁₀ ; вода	496	736	25,3	65,3	9,35
6	H ₈₆₀ + O ₆₁₀ ; воздух	500	752	24,8	67,3	0,312
7	H ₈₆₀ + O ₆₃₀ ; вода	524	722	26,0	66,7	0,78
8	H ₈₆₀ + O ₆₃₀ ; воздух	492	742	24,0	65,7	0,366
9	H ₈₆₀ + O ₆₅₀ ; вода	481	728	24,8	65,0	0,54
10	H ₈₆₀ + O ₆₅₀ ; воздух	472	728	26,2	66,7	0,68

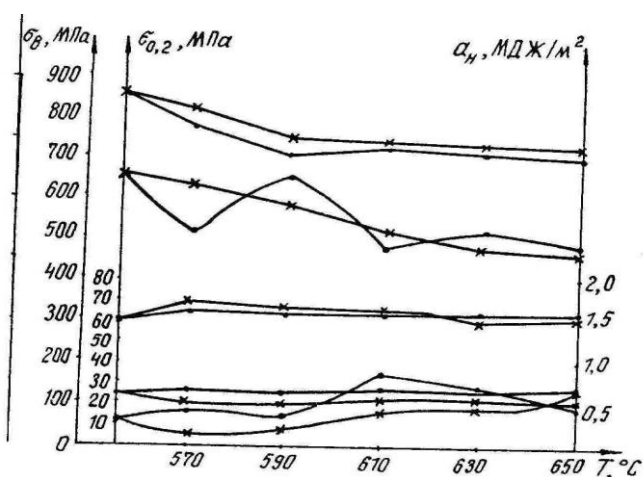


Рис. 2. Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температуры отпуска:

- при охлаждении в воде; - на воздухе

Анализ приведенных результатов показал, что пластические свойства δ и ψ слабо зависят от температуры отпуска $T_{\text{отп}}$ и режима охлаждения. Прочностные свойства $\sigma_{\text{в}}$ уменьшаются в интервале температур отпуска 550-590°C с $\sigma_{\text{в}} = 840$ МПа (84 кг/мм²) при $T_{\text{отп}} = 550$ °C до $\sigma_{\text{в}} = 700-750$ МПа (70-75 кг/мм²) при $T_{\text{отп}} = 590$ °C. При дальнейшем повышении температуры отпуска до 650°C происходит уменьшение лишь предела текучести с $\sigma_{0,2} = 580-600$ МПа (58-60 кг/мм²) при $T_{\text{отп}} = 590$ °C, до $\sigma_{0,2} = 470$ МПа (47 кг/мм²) при $T_{\text{отп}} = 650$ °C, а прочностные свойства $\sigma_{\text{в}}$ практически постоянны. Ударная вязкость чувствительна как к изменению режима охлаждения вода – воздух, так и к температуре отпуска. Более предпочтительным режимом охлаждения является охлаждение в воду. Максимальная ударная вязкость $\alpha_{\text{Н1}}^{-40^{\circ}} = 0,8-0,9$ МДж/м² (8-9 кгм/см²) получается при $T_{\text{отп}} = 610^{\circ} - 630^{\circ}$ и охлаждение в воде.

Таким образом, оптимальным режимом термической обработки можно считать нормализацию при $T = 860$ °C и высокий отпуск при температуре 610°-630°C и охлаждение в воде. Этот режим обеспечивает механические свойства, отвечающие требованиям, предъявляемым к материалу цепей II категории прочности.

В основу режимов термической обработки стали 26Г2СБА и 25ХГМНТБА для материалы цепей III категории прочности заложена высокотемпературная нормализация (935-950°), закалка (3) и высокий отпуск. Температура закалки менялась от температуры $A_{\text{с1}} + 20$ °C. Температура отпуска во всех случаях была 610°C, охлаждение в воде. Отработку режимов термической обработки проводили на пластинах 20x130x250 мм, вырезанных их горячекатаных заготовок сечением 130x130 мм. Из пластин, прошедших комплексный режим обработки, для определения механических свойств, вырезали по три разрывных образца и по три ударных. В табл. 2. на рис. 3, 4 приведены результаты механических характеристик стали 26Г2СБА и 25ХГМНТБА и зависимость их от температур закалки.

Таблица 2

Зависимость механических свойств опытных сталей от температуры закалки

Марка стали	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	$\alpha_{\text{Н4}}^{\circ}$, МДж/м ²
26Г2СБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac1}}^{780^{\circ}} + 20^{\circ} + 0_{610^{\circ}}$	585	778	22,5	62,0	0,41
26Г2СБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{830^{\circ}} + 0_{610^{\circ}}$	713	837	22,3	64,0	1,46
26Г2СБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{880^{\circ}} + 0_{610^{\circ}}$	711	838	21,5	63,5	0,84
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac1}}^{760^{\circ}} + 20^{\circ} + 0_{610^{\circ}}$	732	814	19,6	62,0	1,09
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac1}}^{780^{\circ}} + 40^{\circ} + 0_{610^{\circ}}$	747	900	20,0	63,0	1,19
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{800^{\circ}} + 0_{610^{\circ}}$	714	914	18,9	63,7	1,38
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{830^{\circ}} + 0_{610^{\circ}}$	592	697	20,6	79,1	0,2
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{850^{\circ}} + 50^{\circ}$	864	935	15,6	70,0	1,10
25ХГМНТБА	$H_{930^{\circ}} + 3_{\text{Ac3}}^{900^{\circ}} + 100^{\circ} + 0_{610^{\circ}}$	1005	1080	15,0	62,0	0,99

--	--	--	--	--	--	--

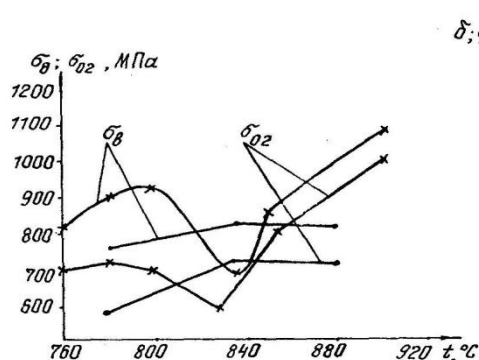


Рис. 3. Зависимость предела прочности и предела текучести от температуры закалки:
 - сталь 26Г2СБА;
 - сталь 25ХГМНТБА

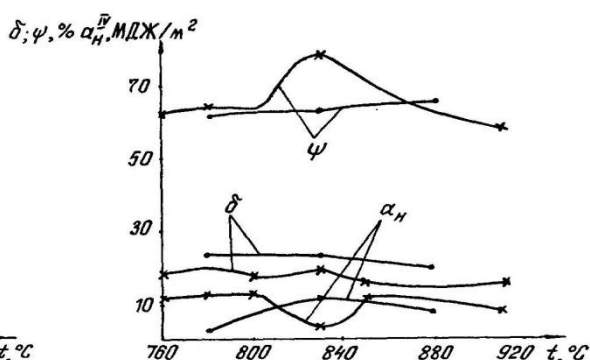


Рис. 4. Зависимость пластических и вязких характеристик от температуры закалки:
 - сталь 26Г2СБА;
 - сталь 25ХГМНТБА

Анализ полученных данных показывает, что для стали 26Г2СБА характерно повышение пределов текучести и прочности с увеличением температуры закалки от 780° до 830°С. При дальнейшем увеличении температуры закалки от 830° до 880°С характеристики $\sigma_{0,2}$ и σ_B не изменяются. Сталь 25ХГМНТБА имеет провал прочностных свойств $\sigma_{0,2}$ и σ_B , а также провал ударной вязкости при температуре 830°С. Пластические свойства стали 26Г2СБА находятся на высоком уровне во всем диапазоне исходных температур. У стали 25ХГМНТБА в районе спада прочности наблюдается увеличение относительного сужения, однако с повышением температуры закалки значения относительного сужения снижаются. Ударная вязкость стали 26Г2СБА характеризуется значительным увеличением при температуре 830°С, соответствующей температуре A_{c3} .

Ударная вязкость стали 25ХГМНТБА достигает максимального значения при температуре 800°С, также соответствующей температуре A_{c3} .

Таким образом, оптимальное сочетание прочностных, пластических и вязких свойств исследуемых сталей достигается при закалке с температуры A_{c3} – для стали 26Г2СБА при 830°С, а для стали 25ХГМНТБА при 800°С. Оптимальная температура отпуска определялась на пластинах 20x130x250 мм, прошедших нормализацию при температуре $A_{c3}+100^\circ\text{C}$ и закалку при температуре A_{c3} .

По две пластины стали 26Г2СБА нагревали до температуры 590, 610, 630°С, выдерживали при этих температурах по два часа из расчета 6 мин на 1 мм сечения и затем одну пластину охлаждали в воде, а другую на воздухе. Пластины стали 25ХГМНТБА после отпуска охлаждали только в воде. Вырезку образцов и испытание проводили по ранее приведенной методике. Результаты испытаний образцов и зависимость механических свойств от температуры отпуска приведены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

Таблица 3

Зависимость механических свойств опытных сталей от температуры отпуска

Марка стали	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	$\alpha_{H4}^{0^\circ}$, МДж/м ²
1	2	3	4	5	6	7
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{c3}^{830} + 0_{590}$	749	864	22,3	63,0	0,85
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{c3}^{830} + 0_{590, \text{воздух}}$	753	867	20,8	60,0	0,85

26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{610}$	713	848	21,2	62,0	0,59
---------	--	-----	-----	------	------	------

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{610}$, ВОЗДУХ	709	826	22,7	63,0	0,72
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{630}$	632	762	24,4	64,0	0,72
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{630}$, ВОЗДУХ	591	751	25,3	64,7	0,58
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{590}$	779	871	19,25	65,7	0,141
25ХГМНТБА	$H_{990^\circ} + A_{C3}^{800} + O_{610}$	682	824	20,8	67,5	0,144
25ХГМНТБА	$H_{990^\circ} + A_{C3}^{800} + O_{630}$	626	744	23,0	68,3	0,128

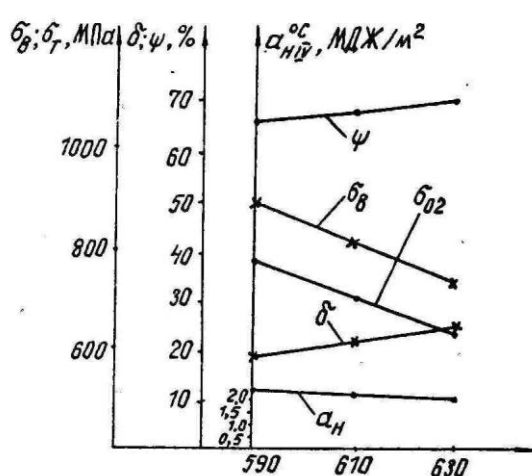


Рис. 5. Зависимость механических свойств стали 25ХГМНТБА от температуры отпуска с охлаждением в воде

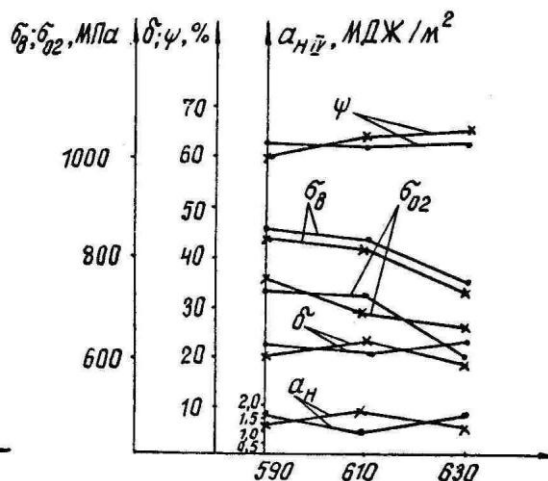


Рис. 6. Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температуры отпуска:
- с охлаждением в воде;
- с охлаждением на воздухе

Исследования микроструктуры образцов после улучшения (закалка+отпуск) показала, что структура имеет сорбитообразный характер с наличием равномерно распределенного игольчатого феррита, а такая структура позволяет получить высокие физико-механические свойства.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что оптимальное сочетание прочностных пластических и вязких свойств достигается для стали 26Г2СБА при температуре отпуска 590°C с охлаждением заготовок после отпуска в воде.

Выводы

1. Оптимальным режимом термической обработки проката из стали 26Г2СБА является нормализация от 930°C, закалка от A_{C3} (830°C) и высокий отпуск при температуре 590-610°C с последующим охлаждением в воде.

2. Оптимальным режимом термической обработки проката из стали 25ХГМНТБА является нормализация от 930°C, закалка из межкритического интервала от $A_{C1} + (40-60^\circ C)$ и высокий отпуск при температуре 600°C с последующим охлаждением в воде.

Кроме того, обе марки стали не только обеспечивают требования МАКО к цепям по-

вышенной и особой категории прочности по прочностным и пластическим характеристикам, но и значительно превышают их.

Библиографический список

1. Астафьев, А.А. Разработки режимов термообработки и межкритического интервала температур стали 10Г2Н2МФЛ / А.А. Астафьев, С.И. Марков // ЦНИИТМАШ. 1987. Т. 255. С. 10.
2. Марченко, Б.А. Закалка сталей от межкритических температур // МИТОМ. 1985. №3. С. 57.
3. Полушкин, Н.А. Особенности режима термической обработки низколегированной стали 26Г2СТА / Н.А. Полушкин, Л.П. Казанский, А.Д. Клипов, З.Ф. Кильдюшева // МИТОМ. 1990. № 6. С. 7.

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

L.P. Kazansky, V L. Sivkov, L.M. Bistina

INVESTIGATION OF HEAT MODE ON QUALITY ROLLED PRODUCTS OF STRUCTURAL LOW-ALLOY STEEL 26G2SBA AND 25HGMNTBA

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Increase the plastic and viscous characteristics while maintaining sufficiently high strength properties - the main task in the development mode. Heat treatment of steel and 26G2SBA 25HGMNTBA.

Design/methodology/approach: Explore different modes of heat treatment of rolled steel and 26G2SBA 25HGMNTBA and select the best option, providing the requirements of IACS and RF Register to anchor chains made of these steels.

Findings: 1. Optimal mode of heat treatment of rolled steel 26G2SBA is the normalization of 930 ° C, quenching from AC3 (830 ° C) and high temperature tempering at 590-610 ° C, followed by cooling in water. 2. Optimal thermal treatment of rolled steel is normalized 25HGMNTBA from 930 ° C of tempering intercritical range of Ac1 + (40-60 ° C) and high temperature tempering at 600 ° C followed by cooling in water. In addition, both brands have become not only provide IACS requirements for chains and increased strength as a special category of strength and ductility characteristics, but also far exceed them.

Research limitations/implications. Study the microstructure of the samples after improvement (quenching + tempering) showed that the structure has sorbitoобразny character with the presence of uniformly distributed acicular ferrite, and such a structure allows to obtain high mechanical properties.

Originality/value. The critical points Ac1 and Ac3, the tendency of steel to grain growth during heating, as well as the kinetics of phase transformations of super cooled austenite.

Key words: Low alloy structural steel, heat treatment - normalization, hardening, tempering, critical points, structural transformations, structure sorbitoобразnaya after improvement, the kinetics of phase transformations.

УДК.539.26:548.73

Л.А. Ошурина

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЫВИСТОГО РАСПАДА В ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследованы особенности фазовых превращений в элинварных сплавах после различных режимов термообработки с помощью рентгеноструктурного анализа. Используются методики определения наличия субструктур, модулированных структур и изучения спиноидального распада в данных материалах. Детально исследованы фазовый состав образующихся в результате распада интерметаллидных соединений и промежуточных структурных состояний мартенсита в сплаве 21НКМТ.

Ключевые слова: элинварные сплавы, субструктура, ячеистая структура, спиноидальный распад.

Теория превращений в твердом состоянии является основой для управления структурой и свойствами металлов и сплавов при их обработке.

Управление гетерофазной структурой является одним из наиболее эффективных средств направленного изменения свойств кристаллических материалов. При этом под гетерофазной структурой следует понимать форму, размер и взаимное расположение отдельных фазовых составляющих многофазной системы, а также строение межфазных границ. Вместе с дефектами кристаллического строения, их типом и характером распределения гетерофазная структура определяет весь комплекс структурно-чувствительных свойств реальных твердых тел. Изучение свойств гетерофазных материалов в зависимости от их структуры составляет содержание различных разделов физики реальных кристаллов, а выяснение природы такой структуры и путей ее образования является основной задачей физического материаловедения.

Изучение эволюции гетерофазной структуры в зависимости от внешних условий и возможных метастабильных состояний составляет предмет теории фазовых превращений. Знание кинетики превращения позволяет прогнозировать неравновесные состояния, фиксируемые закалкой на разных стадиях превращения, после различных термических или механических обработок, а также описывать поведение материалов, испытывающих превращение непосредственно в процессе использования. Это относится и к элинварным сплавам.

Элинварные сплавы имеют практически постоянный модуль упругости в широком интервале температур. И в то же время являются материалами с крайне неравновесной структурой, в результате чего возможно изменение модуля упругости.

Компенсация «нормального» падения E при нагреве происходит вследствие протекания необратимых структурных изменений в материале. Это может вызываться, *во-первых*, выделением новой фазы (например, интерметаллидной), имеющей более высокий модуль упругости. *Во-вторых*, заниженные значения E могут быть обусловлены обработками, приводящими к получению пересыщения матричной фазы по растворенным элементам либо по дефектам кристаллической решетки (вакансиям, дислокациям). Такие эффекты наблюдаются соответственно в результате закалки на пересыщенный твердый раствор или вследствие значительной пластической деформации. При нагреве материала с такой неравновесной структурой в нем будут происходить необратимые превращения, направленные на получение равновесного состояния. Как результат, это приведет к восстановлению модуля Юнга, и, следовательно, в каком-то температурном интервале в принципе можно обеспечить сохранение его постоянства. Понятно, что указанный эффект может быть реализован лишь однажды, поскольку сплав в исходном состоянии должен обладать структурной неравновесностью [1].

В данной работе проведено рентгеноструктурное исследование фазовых превращений эливарных сплавов 36НКВХБТЮ-ВИ, 44НХТЮ, 21НКТ после различных режимов термообработки. В табл. 1, 2, 3 приведен химический состав данных сплавов.

Таблица 1

Химический состав сплава 44НХТЮ, % (остальное железо)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti
до 0.05	0.3-0.6	0.3-0.6	43.5-45.5	до 0.02	до 0.02	5.0-5.6	2.2-2.7

Таблица 2

Химический состав сплава 36НКВХБТЮ-ВИ, %

C	Cr	Ni	W	Nb	Ti	Al	Co	V
<0.05	4,3	36	5,82	3,9	2,0	0,89	9,28	0,33

Таблица 3

Химический состав стали 21НМКТ по ТУ 14-1-5359-98

содержание основных элементов, %							
Ni	Co	Mo	Ti	C	Si	Mn	Cr
20.5-21.5	8,5-9,5	4,5-5,5	0,6-0,9	0,03	0,1	0,2	0,3

Съёмка рентгенограмм производилась на рентгеновском дифрактометре общего назначения: ДРОН-2.

Режим съёмки:

Материал анода – Fe,

U - 25 кВ,

I - 0,5 мА.

Щели: 1 мм -2 мм.

Анализ результатов рентгеноструктурного исследования сплава 44НХТЮ

После закалки основной фазовый состав практически не изменяется. На рентгенограммах появляются линии- сателлиты, характеризующие увеличение степени упорядочения γ / фазы ($Ni_3(Ti, Al)$)/

В процессе старения возрастает степень упорядоченности фазы Ni_3Ti /

Возможно образование комплексов $(Fe,Ni)_3(Ti, Al)$, подтверждённое изменением межплоскостного расстояния и наличием спектральных линий, характеризующих модулированную структуру/

В процессе термообработки (закалка, старение) происходит изменение интенсивности спектральных линий структуры. Структура характеризуется прерывистым характером превращений Ni_3Ti (ГПУ-решётка), растворением пересыщенного твердого раствора. Прерывистый характер превращений сменяется непрерывным (расслоение твёрдого раствора на γ и γ' фазу).

Анализ графической зависимости изменения интенсивности подтверждает смену механизма превращения.

Старение сплава происходит по смешанной кинетике, предполагающей развитие прерывистого (ячеистого) и непрерывного превращений. Прерывистое превращение протекает активнее при низких температурах старения, непрерывное – при более высоких. Скачкообразное изменение состава матричного раствора (прерывистая реакция) в наибольшей степени влияет на структура аустенита, изменяя параметры решетки. В случае протекания прерывистой реакции в ячейках раствора матричный твёрдый раствор приобретает состав, практи-

чески близкий к равновесному, т.е. реакция происходит с резким снижением содержания Ni, вследствие выделения богатой Ni избыточной фазы типа $Ni_3(Ti,Al)$. Прерывистый распад сопровождается образованием ячеистой структуры с локальным характером распределения примеси [2]. Непрерывный распад охватывает весь объем зерна и протекает с плавным изменением состава твердого раствора и обеспечивает наилучший эффект дисперсионного упрочнения.

В процессе ступенчатого старения происходит увеличение количества продуктов прерывистой реакции. Ступенчатое старение приводит к 2-м эффектам: усиление непрерывного и прерывистого превращений. Разупрочнение сплавов на основе Ni при старении связано с появлением упорядоченности в расположении интерметаллидных частиц по объему матрицы

Движущей силой процессов пространственного упорядочения выделений является энергия упругих межфазовых напряжений. Особенностью прерывистого распада сплава 44НХТЮ является наличие сверхструктурных линий на рентгенограммах, характеризующих спиноидальный распад.

Спиноидальный распад обычно описывают в виде образования концентрационных волн с очень малой амплитудой. Основные различия между зародышеобразованием и спиноидальным распадом представлены в табл. 4.

Таблица 4

Основные признаки двух типов распада

Характеристика процесса	Спиноидальный распад	Распад путем зарождения и роста
Состав начального продукта распада	Близок к составу матрицы	Близок к составу равновесного выделения
Структура начального продукта распада	Изоморфна матрице	Изоморфна или неизоморфна матрице
Тип диффузии	Восходящий	Нормальный
Необходимость энергии активации	Нет	Есть
Наличие инкубационного периода	Нет	Есть
Возможность путем закалки зафиксировать метастабильный твердый раствор	Нет	Есть

Из табл. 4 следует, что при спиноидальном распаде должен отсутствовать инкубационный период и энергия активации процесса, характерные для зародышеобразования, а также должна иметь место восходящая диффузия и изоморфность матрицы и продуктов распада.

Феноменологическая теория спиноидального распада была разработана в работах Кана, Хиллиарда и Хиллerta [3]. Кан впервые учел вклад энергии упругой деформации и анизотропии упругих свойств матрицы в изменение свободной энергии всей системы при распаде. В теории Кана рассматривались бинарный упруго-изотропный твердый раствор и его устойчивость по отношению к флуктуациям состава. В процессе спиноидального распада образующиеся фазы изоморфны друг другу, их кристаллические решетки когерентно сопряжены, и процесс осуществляется непрерывным образом. Дефекты кристаллического строения при этом не учитываются.

Амплитуда флуктуаций твердого раствора не зависит от степени переохлаждения и определяется условием потери когерентности, которая происходит, если различия в периодах приводят к когерентным деформациям порядка 1-3%.

Наличие модуляций проявляется в появлении сателлитов на дифрактограммах около определенных рефлексов. В микроструктуре при этом наблюдается строго закономерное расположение частиц. Такие структуры называют модулированными. Следует иметь в виду, что наблюдение модулированной структуры еще не позволяет считать распад спиноидальным,

поскольку периодическое расположение частиц может возникать благодаря упругому взаимодействию и при обычном распаде.

Анализ результатов рентгеноструктурного исследования сплава 36ННКВХБТЮ-ВИ

В данном сплаве после закалки 1000С° и деформации 50% наблюдается двухфазное состояние: аустенит и интерметаллиды γ' (Ni,Fe,Co,Nb)(Ti,Al). При этом выделяются карбиды NbC, CrC₃, Fe₃W₃C, TiC. Данная структура после доформации на 50 % становится упорядоченной, на рентгенограммах появляются сверхструктурные линии. Процесс расслоения твердого раствора ускорен. После отжига происходит растворение интерметаллидных частиц и образование ячеистой субструктуры. С повышением температуры отжига объем материала, претерпевающий прерывистый распад, уменьшается. Выделение интерметаллидных частиц способствуют эффекту перестраивания. Непрерывное растворение избыточных фаз приводит к выделению интерметаллидных частиц из твердого раствора, при этом мелкозернистая структура способствует увеличению степени прерывистого распада.

Особенностью прерывистого распада сплава 36ННКВХБТЮ-ВИ является прерывистое выделение интерметаллидных частиц в результате образования метастабильного твердого раствора.

Пересыщенный α_0 твердый раствор в результате реакции распадается на выделяющуюся фазу и истощенный раствор. Скачкообразное изменение концентрации твердого раствора хорошо выявляется в измерениях периода решетки и при непосредственном определении концентрации методами микроанализа высокого разрешения.

Существуют два типа реакции прерывистого выделения фаз: ячеистый распад и распад, связанный с генерацией мест зарождения дислокаций на фронте реакции. Термин «ячеистый» указывает на образование ячеистых областей материала, претерпевших прерывистый распад.

В деформированных сплавах возможно образование участков прерывистого распада и внутри зерен. Частицы неизоморфной, а, следовательно, некогерентной фазы в ячейках прерывистого распада растут в виде пластин, и часто наблюдается строгое ориентационное соответствие между матрицей и пластинами новой фазы. Это, как правило, наблюдается в тех случаях, когда матрица и выделяющиеся фазы имеют хорошо сопрягающиеся плоскости.

Анализ результатов рентгеноструктурного исследования сплава 21НКМТ

В элинварах, стареющих по механизму смешанной кинетики, температурные области развития разных типов распада различаются: прерывистое превращение идет при низкотемпературном старении, а непрерывное - при более высокой температуре. В силу особенностей распада (скачкообразное изменение состава матричного раствора) прерывистая реакция наиболее сильно воздействует на изменение коэффициента γ . В то же время непрерывный распад, охватывающий объем зерна и идущий с плавным изменением состава твердого раствора, обеспечивает наилучший эффект дисперсионного твердения. Поэтому оптимальное сочетание прочностных и термоупругих свойств элинваров достигается путем преимущественного усиления непрерывного выделения и ограничения доли прерывистого распада. Реализация подобной кинетики превращения достигается проведением специальной термообработки.

Результаты рентгеноструктурного анализа сплава 21НКМТ после закалки и старения показывают, что в структуре происходит механизм смешанной кинетики (непрерывный и прерывистый распад твердого раствора). В процессе механизма смешанной кинетики изменяется количество остаточного аустенита и количество предмартенситной фазы. При этом наблюдается крайне нестабильное состояние материала. Практически без инкубационного периода возникают прерывистые выделения интерметаллидных фаз типа FeCo (ГПУ ре-

шетка). Количество и размер частиц в результате спонтанного распада непрерывно меняется, при этом изменяется структура матрицы. Непрерывный распад в структуре матрицы происходит через промежуточные состояния, образующиеся мартенситные структуры изменяют структуру кристаллической решетки по следующей схеме: аустенит (ГЦК решетка) превращается в предмартенсит (ГПУ решетка) с измененным параметром решетки, затем предмартенсит превращается в решетку ОЦТ с измененным параметром, характеризующаяся минимальной тетрагональностью.

Особенностью данного сплава 21 НМКТ является механизм по типу спонтанного распада [3]. На стадии старения происходит образование зародышевых центров новой фазы и последующий их быстрый рост до некоторого определенного размера, зависящего для данного сплава от температуры процесса. Возникающие зародышевые центры определенным образом кристаллографически ориентируются по отношению к исходной фазе, сопрягаясь с ней плоскостями, наиболее близкими по структуре и размерам.

Если новая фаза по структуре и размерам кристаллической решетки сильно отличается от исходной фазы, то процесс ее образования может протекать через ряд промежуточных метастабильных состояний.

Спонтанный распад может приводить к возникновению значительных внутренних напряжений как за счет объемных изменений, так и за счет когерентного сопряжения между старой и новой фазами. Возникновение внутренних напряжений обычно ускоряет процесс распада, и он носит автокаталитический характер.

На характер и кинетику спонтанного распада может оказывать существенное влияние пластическая деформация. Пластическая деформация весьма значительно сокращает инкубационный (латентный) период, в результате чего становится возможным протекание процесса распада при более низких температурах и с большей скоростью.

При спонтанном распаде зародыши новой фазы быстро растут до некоторого размера, зависящего от температуры старения, после чего их рост приостанавливается. Рост зародышевых центров прекращается несмотря на то, что раствор еще не достиг равновесной концентрации и находится в пересыщенном состоянии.

При низкотемпературном спонтанном распаде возникающие зародыши новой фазы имеют высокую степень дисперсности. После возникновения зародыши когерентно растут от критического размера $r_{кр}$ до какого-то размера r . При этом частицы новой фазы все еще продолжают находиться в состоянии высокой степени дисперсности. К моменту прекращения роста частиц новой фазы устанавливается своеобразное метастабильное равновесие между все еще пересыщенным твердым раствором и высокодисперсными частицами новой фазы. Для того чтобы подчеркнуть высокую дисперсность выделившихся частиц, С. Т. Конобеевский назвал это метастабильное равновесие *коллоидным равновесием*.

С ростом зародышей новой фазы, вследствие их укрупнения, степень пересыщенности-раствора должна была бы все время возрастать, если бы состав твердого раствора не менялся. Однако одновременно с ростом множества зародышей новой фазы твердый раствор меняет свой химический состав.

В настоящее время редко разделяют стадии спонтанного распада и коллоидного равновесия. Обычно выделяют стадии предвыделения, зарождения и роста частиц и коагуляции (коалесценции). При этом основной движущей силой стадии зарождения и роста является градиент химического потенциала (концентрации), а стадии коалесценции-уменьшение энергии межфазных границ.

Таким образом, рентгеноструктурные исследования сплавов 44НХТЮ, 36ННКВХБТЮ-ВИ, 21НМКТ показывают, что прерывистый распад в эливарных сплавах происходит по механизму смешанной кинетики (непрерывный распад твердого раствора

матрицы и прерывистый распад аустенита) с выделением по спиноидальному, спонтанному и ячеистому механизму распада.

Библиографический список

1. **Бараз, В.** Особенности состава, структуры и свойств / В Бараз, В. Стрижак // Национальная металлургия. 2003. №4. С. 95–98.
2. **Суховаров, В.Ф.** Прерывистое выделение фаз в сплавах / В.Ф. Суховаров. – Новосибирск: Наука, 1983. – 167 с.
3. **Попов, А.А.** Теория превращений в твердом состоянии: учеб. пособие / А.А. Попов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 168 с.

*Дата поступления
в редакцию 20.09.2013*

L.A. Oshurina

CHARACTERISTICS OF INTERMITTENT COLLAPSE OF PRECISION ALLOYS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

Peculiarities of phase transitions in elinvar alloys after various heat treatment regimes using x-ray crystallography. Methods used to determine the presence of substruktur, spinoidal study of modulated structures and decay in these materials. Thoroughly researched phase composition resulting from the disintegration of the intermetallide intermediate compounds and structural conditions of martensite in the alloy 21HKMT.

Key words: elinvar alloys, respective, cell structure, spinoidal breakup.

УДК 669-412.54-162.001.5

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ В СЛИТКАХ СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований предложен механизм связывающий формирование зон «замороженных» и столбчатых кристаллов с конвективным движением затвердевающего расплава.

Ключевые слова: стальной слиток, конвекция, зона «замороженных» кристаллов, столбчатые кристаллы.

Известно, что в расплаве, залитом в изложницу, разность плотностей между охлажденным слоем у её стенки и горячим объёмом в центральной части приводит к развитию естественной конвекции. Вдоль поверхности охлаждения возникает нисходящий поток, а в осевой зоне слитка – обратный восходящий. Интенсивность конвекции зависит от разности температур поверхности охлаждения и расплава, а также вязкости последнего. Экспериментально установлено [1], что скорость движения расплава в нисходящем потоке по мере затвердевания слитка сначала довольно быстро снижается до определенного уровня (практически до нуля), далее несколько возрастает и в дальнейшем остаётся примерно на постоянном уровне (рис. 1).

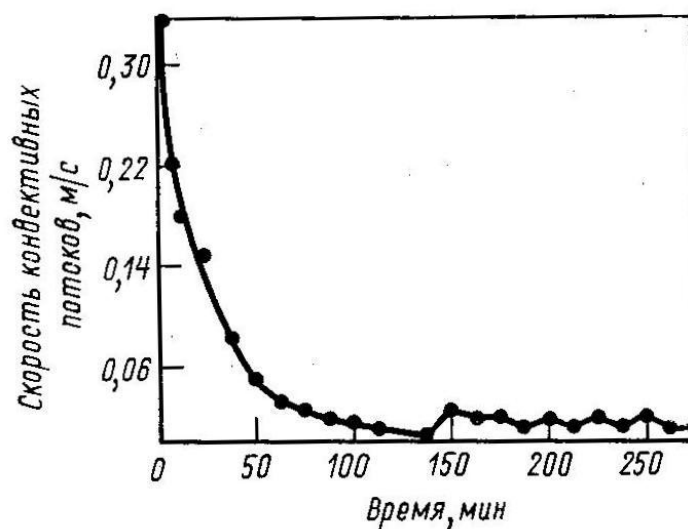


Рис. 1. Изменение скорости конвективных потоков в 40-тонном слитке в зависимости от продолжительности кристаллизации (через 50 мин после окончания заливки – 0,03 м/с; через 130 мин равна нулю)

В период заливки изложницы наружный слой расплава переохлаждается на глубину, определяемую температурой изложницы и интенсивностью движения жидкого металла. Практически это переохлаждение ($\Delta T_{\text{п}}$) всегда имеет величину, достаточную для зарождения на активных примесях на поверхности охлаждения и в прилежащем к ней объеме жидкой фазы изолированных кристаллов ($\Delta T_{\text{з.кр}}$):

$$\Delta T_{\text{п}} > \Delta T_{\text{з.кр}} \quad (1)$$

Поскольку турбулентные конвективные потоки расплава уносят большее количество этих кристаллов из зоны переохлаждения, то фиксируются и растут в основном только те частицы твердой фазы, которые зародились на активных примесях самой поверхности формы. Их смыванию препятствует, в том числе, и металлостатическое давление.

Дальнейшее формирование структуры слитка возможно по нескольким вариантам.

Вариант 1. Расплав в изложницу залит с перегревом, достаточным для образования вдоль поверхности охлаждения нисходящего турбулентного конвективного потока. При этом в пристенном ламинарном подслое жидкости, на который приходится практически весь перепад температуры, в течение некоторого времени выполняется условие (1), и происходит зарождение изолированных кристаллов на примесях. Вследствие исчезновения объема на поверхности раздела твердой и жидкой фаз, возникают перемещения расплава, транспортирующие эти изолированные кристаллы из переохлажденного слоя жидкости к зафиксированной на поверхности изложницы корке затвердевшего металла.

Сила ($F_{yc.k}$), действующая на изолированные кристаллы со стороны жидкости, перемещающейся вследствие усадки, определяется как [2]:

$$F_{yc.k} = - \int_0^V \text{grad } P_{yc.x} dV_k;$$

где $\text{grad } P_{yc.x} = \gamma v_x dv_x/dx$ – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объема при фазовом переходе; γ – плотность жидкости; v_x – скорость усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания; V_k – объем кристалла.

Формируется слой мелкокристаллической структуры (зона «замороженных кристаллов»), который снижает интенсивность теплоотвода от расплава и переохлаждение жидкости перед фронтом твердой фазы. Размеры кристаллов в этой зоне соизмеримы с толщиной ламинарного подслоя нисходящего потока. Турбулентное конвективное движение расплава в период формирования корковой зоны слитка, поддерживает значительный температурный градиент на границе раздела фаз и ограничивает величину и глубину проникновения термического переохлаждения в пристенном слое расплава. Искусственное торможение конвекции, например с помощью вставленных в изложницу горизонтально кварцевых трубок, вызывает увеличение слоя мелкокристаллической структуры в 3-7 раз [1].

Вследствие нарастания теплового сопротивления затвердевшей корки, выделения теплоты кристаллизации и подвода тепла из центральной зоны слитка турбулентным потоком, величина переохлаждения $\Delta T_{п}$ становится недостаточной для зарождения изолированных кристаллов, но достаточной для роста их осей ($\Delta T_{p.k}$):

$$\Delta T_{p.k} < \Delta T_{п} < \Delta T_{з.кр}. \quad (2)$$

В этих условиях начинается преимущественный рост осей кристаллов «замороженного» слоя в сторону, обратную направлению градиента температуры в слитке, так как рост параллельно поверхности охлаждения невозможен из-за наличия соседних дендритов. Формируется зона столбчатых кристаллов.

Рост кристаллов сопровождается образованием на их поверхности слоя, обогащенного ликвирующими примесями. Выделению ликватов в жидкую фазу в процессе формирования столбчатой структуры препятствует разрежение, возникающее в межосных пространствах вследствие усадки. В результате этого химический состав транскристаллитной зоны слитков спокойной стали соответствует ковшевой пробе (в кипящей стали интенсивное газовыделение способствует выносу ликватов в жидкую фазу и обеднению зоны столбчатых кристаллов углеродом и примесями [3]).

Конвективная диффузия, обеспечиваемая турбулентным нисходящим вдоль фронта твердой фазы потоком, уменьшает концентрацию примесей перед обращенными к оси слитка вершинами осей кристаллов и стимулирует их рост.

Если при затвердевании технически чистых металлов малая концентрация примесей в расплаве не препятствует росту столбчатых кристаллов даже при незначительной интенсивности конвекции в малых объёмах, то в реальных сплавах снижение концентрации примесей перед межфазной поверхностью достигается только в условиях турбулентного конвективного потока.

Повышенной длительностью интенсивной естественной конвекции жидкого металла можно объяснить факты увеличения протяженности столбчатой структуры при повышении перегрева стали, разливаемой в изложницы [1], а также при возрастании массы слитка [4]. Данный вариант образования структуры – переход от замороженного слоя к столбчатым кристаллам, встречается наиболее часто при производстве слитков и отливок.

Прекращение роста столбчатых кристаллов происходит вследствие затухания конвекции. При переходе от турбулентного движения к ламинарному резко уменьшается коэффициент диффузии примесей из ликвационного слоя в расплав центрального объёма слитка. В результате температура ликвидуса сплава в этом слое и соответственно переохлаждение в нём снижаются – по терминологии предложенной А. Оно возникает концентрационная депрессия переохлаждения. Направленный рост дендритов останавливается и за ликвационным слоем, в переохлаждённом расплаве зарождаются по гетерогенному механизму изолированные кристаллы.

Изложенный подход к формированию поверхностных слоёв слитка подтверждается результатами известного эксперимента с установленными в изложницу пробками из кварцевого стекла, имеющими отверстия для прохождения расплава и представленными на рис. 2 [5].

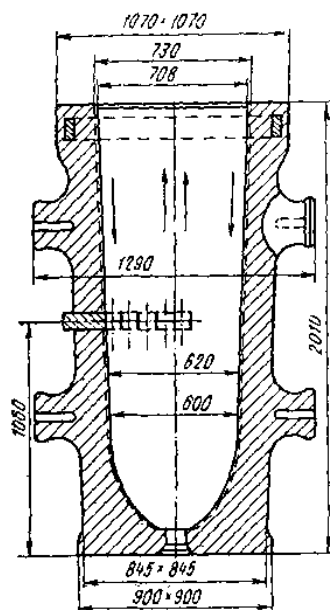


Рис. 2. Схема установки в изложницу кварцевой секционной пробы, состоящей из пяти пробниц

На рис. 3 приведён авторский вариант схемы структуры стали на осевом темплете слитка вне и внутри пробниц [6]. Было установлено, что структура внутри пробниц имеет существенные отличия – со стороны изложницы во всех секциях имеет место зона разноориентированной (глобулярной) структуры, а с противоположной – зона столбчатых кристаллов.

С изложенных позиций такое чередование структурных зон может быть объяснено следующим образом. В примыкающей к изложнице зоне пробницы, вследствие отсутствия конвекции, создаётся застойная область и зарождающиеся в переохлаждённом слое изолированные кристал-

лы не уносятся с нисходящим потоком. Наличие в корковом слое более крупных, чем вне пробницы кристаллов («глобулярных дендритов, характерных для осевой зоны слитка» [5, 6]) указывает на их более длительное пребывание в окружении жидкой фазы. Это можно объяснить большей шириной переохлаждённой области зарождения кристаллов и соответственно более длительным процессом их переноса к поверхности раздела фаз за счёт усадочных перемещений расплава.

Продвижение фронта твёрдой фазы образованной этими кристаллами продолжается до границы отверстия в пробнице. Здесь величина переохлаждения расплава резко уменьшается вследствие наличия конвективного потока. Условия затвердевания внутри пробницы и вне её выравниваются – идёт формирование направленной структуры (в пробнице рост столбчатых кристаллов ограничивается перегородкой).

За перегородкой в застойной области второй секции пробницы теплоотвод через твёрдую фазу и отсутствие подвода тепла турбулентным потоком расплава создают условия для объёмного зарождения кристаллов. Переход к столбчатым кристаллам во второй секции пробницы, как и в первой, начинается при появлении перед фронтом затвердевания конвективного движения расплава через отверстие.

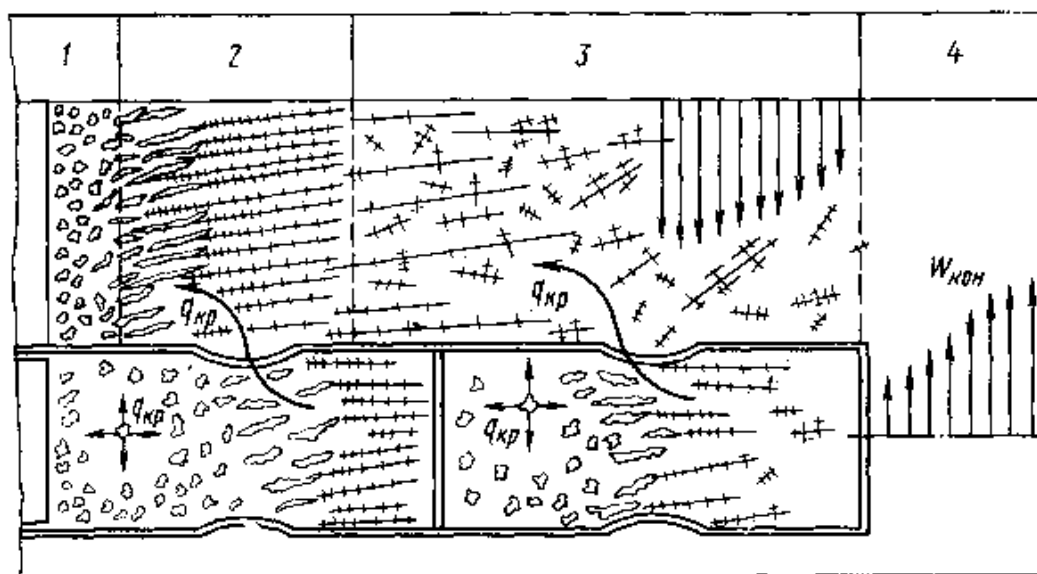


Рис. 3. Схема структуры стали на осевом темплате слитка вне и внутри пробниц:

1 – 4 – структурные зоны основного металла слитка: корковая, столбчатых кристаллов, переходная смешанных кристаллов, и глобулярных дендритов

Вариант 2. Расплав залив в изложницу или в водоохлаждаемый кристаллизатор со значительным перегревом. Вдоль слоя зародившихся на поверхности охлаждения дендритов имеет место интенсивный турбулентный нисходящий конвективный поток. Температурный градиент очень велик, а толщина ламинарного подслоя крайне мала. В этих условиях выполняется условие (2) – величина переохлаждения недостаточна для зарождения кристаллов. Столбчатая структура формируется путём роста осей кристаллов, зародившихся непосредственно на поверхности изложницы (отсутствие «замороженного» слоя). Такой механизм реализуется в слитках ВДП, где имеет место интенсивное электромагнитное перемешивание жидкости [7], а также иногда при непрерывной разливке стали [8].

Поступление более горячего металла сверху и усиленное обмывания верхней поверхности вершин столбчатых кристаллов приводит к их отклонению навстречу нисходящему потоку. Аналогичный эффект имеет место при электромагнитном перемешивании стали в

кристаллизаторе УНРС (столбчатые кристаллы наклонены навстречу потоку в горизонтальной плоскости) [9].

Рост столбчатых кристаллов от поверхности охлаждения возможен также, когда условие (2) достигается за счет ограниченного теплоотвода от расплава (например в предварительно нагретой футерованной прибыльной надставке при разливке стали в изложницы [8]).

Вариант 3. Расплав в изложницу залит с незначительным перегревом. После образования мелкокристаллического коркового слоя конвективное движение расплава вдоль фронта затвердевания переходит в ламинарный режим. Слой переохлажденного расплава имеет значительную толщину. В нем продолжается зарождение изолированных кристаллов – выполняется условие (1). Дальнейшее продвижение фронта твердой фазы происходит только за счет присоединения этих кристаллов – формируется разноориентированная структура. Интенсивность усадочных перемещений жидкости по сравнению с условиями формирования коркового слоя постепенно снижается. Это увеличивает продолжительность пребывания изолированных кристаллов в объеме переохлажденного расплава до присоединения к фронту твердой фазы и соответственно их размеры.

Такая структура (отсутствие зоны столбчатых кристаллов) встречается в крупных слитках, отлитых в вакуумных камерах [10–12].

Выводы

Предложенная описательная модель позволяет связать образование поверхностных структурных зон слитка спокойной стали с интенсивностью конвективного движения расплава в начальный период его формирования. Причиной перехода от разноориентированной мелкокристаллической структуры к столбчатой является уменьшение переохлаждения перед фронтом твердой фазы за счет подвода тепла к нему турбулентным конвективным потоком. Прекращение развития столбчатой структуры происходит из-за снижения интенсивности естественной конвекции, следствием чего является уменьшение коэффициента диффузии примесей из ликвационного слоя перед вершинами кристаллов в центральные объемы расплава и развития концентрационной депрессии переохлаждения в этом слое.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
3. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 228 с.
4. Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
5. Исследование процессов структурообразования и ликвации примесей в слитках спокойной стали / В.Б. Вихляев [и др.] // Проблемы стального слитка: тр. V конференции по слитку. – М.: Металлургия, 1974. С. 81–86.
6. **Вихляев, В.Б.** К вопросу о структуре двухфазной зоны и механизме массопереноса в ней / В.Б. Вихляев, В.А. Ефимов, Н.Я. Ищук // Проблемы стального слитка. 1976. №6. С. 122–129.
7. **Сергеев, А.Б.** Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали / А.Б. Сергеев, Ф.И. Швед, Н.А. Тулин. – М.: Металлургия, 1974. – 192 с.
8. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка / А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
9. Непрерывное литье во вращающемся магнитном поле / А.Д. Акименко [и др.]. – М.: Металлургия, 1971. – 177 с.

10. **Микульчик, А.В.** Химическая неоднородность структуры крупных кузнечных слитков / А.В. Микульчик // Проблемы стального слитка: тр. V конференции по слитку. – М.: Металлургия, 1974. С. 543–545.
11. **Соколов, В.Е.** Исследование 28,5-т слитка, отлитого с углеродным раскислением в вакууме / В.Е. Соколов., А.В. Микульчик, В.Е. Гринь // Усовершенствование процессов разливки стали: тр. VIII научно-технич. конф. – М.: Металлургия, 1981. С. 74–75.
12. **Сенопальников, В.М.** Управление процессами затвердевания слитка спокойной стали / В.М. Сенопальников, Г.А. Лубенец, В.Л. Сивков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. – 128 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.12.2013*

V.M. Senopalnikov, V.L. Sivkov

THE FORMATION OF THE SURFACE STRUCTURE OF INGOTS OF QUIET STEEL

Nizhny Novgorod state technical university. R.E. Alexeev

Purpose: Explanation of the causes of the structural heterogeneity of the ingot.

Method: Analysis of the literature data and the results of our work on the structure of the surface of structural zones ingot quiet steel.

Results of work and their field of application: the Proposed descriptive model allows one to associate the formation of the surface structural zones ingot calm steel intensity of convective motion of the melt in the initial period of its formation.

Conclusions: the Reason for the switch from fine-crystalline structure of the column is to reduce hypothermia in front of the solid phase by supplying heat to him turbulent convective flow. Termination development columnar structures is due to decreasing of intensity of natural convection, resulting in a decrease of the coefficient of diffusion of impurities from enriched ликватами layer before peaks crystals in Central volumes of melt and development of the concentration of depression hypothermia in this layer.

Key words: steel ingot, convection zone of «frozen» crystals, columnar crystals.

УДК 620

Н.В. Редькина

РАЗРАБОТКА СХЕМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ СПЛАВА 44НХТЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе представлены основные моменты при разработке схем термоциклической обработки (ТЦО). В качестве наглядного примера представлен сплав 44НХТЮ.

Ключевые слова: дисперсионно твердеющий сплав, термоциклическая обработка, схема, микроструктура.

Термоциклическая обработка (ТЦО) представляет собой весьма перспективное, но достаточно сложное направление в термической обработке, так как все режимы разрабатываются экспериментально.

Суть ТЦО заключается в многократном повторении нагревов и охлаждений при термической обработке сплавов, при этом факторами, оказывающими влияние на структура металла, являются: количество циклов, интервал термоциклирования (разница между верхней и нижней температурами цикла), наличие и отсутствие выдержек.

Общая схема ТЦО представлена на рис. 1.

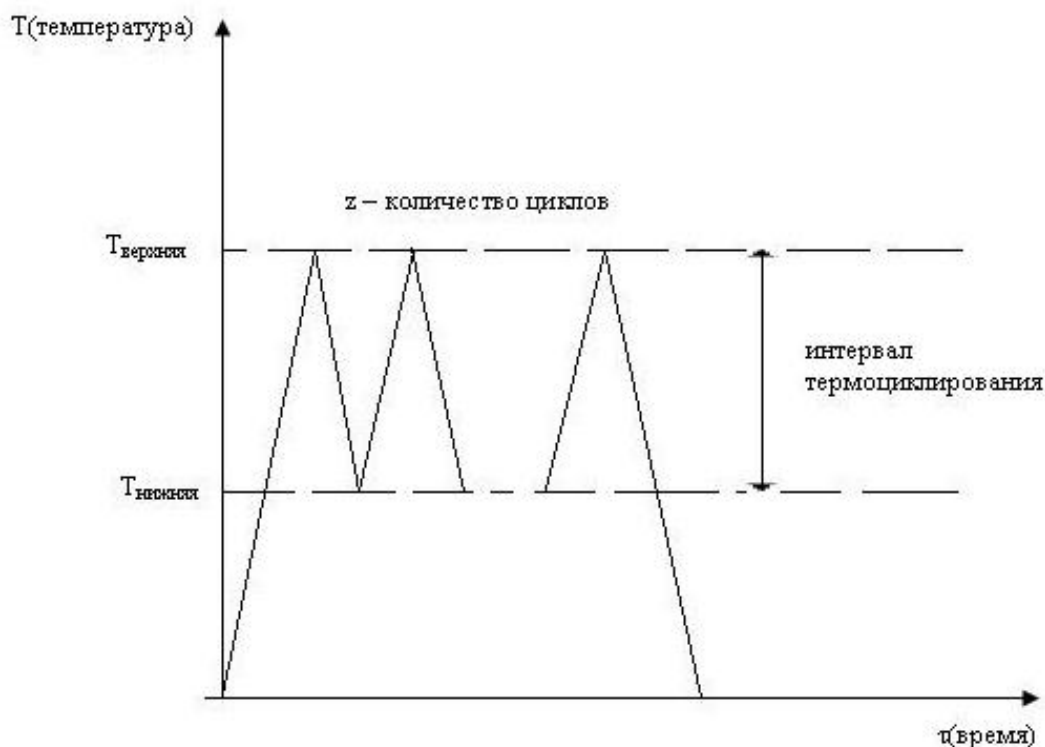


Рис. 1. Общая схема ТЦО

Согласно В.К. Федюкину, разработаны и применяются на практике несколько разновидностей ТЦО сталей и сплавов (рис. 2), различающихся температурно-скоростными параметрами. К ним относят маятниковую, средне- и высокотемпературную ТЦО сталей и чугунов, а также НТЦО чугунов [1].

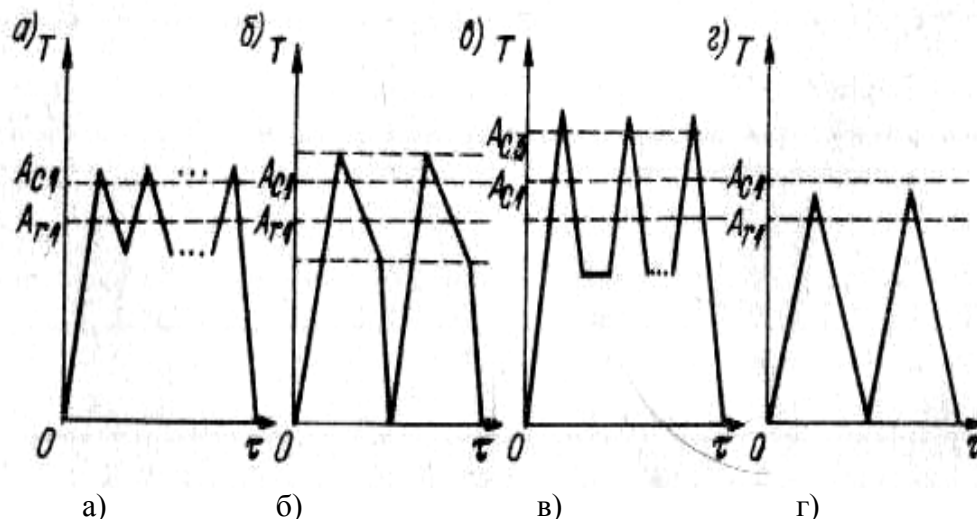


Рис. 2. Классические схемы ТЦО сталей и чугунов:

а - маятниковая; б - среднетемпературная; в - высокотемпературная; г - низкотемпературная

Маятниковую ТЦО используют для измельчения зерна сталей ферритно-перлитного класса. При этом предусмотрен печной нагрев до температуры на 30-50°C выше температуры A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 50-80°C ниже критической температуры A_{r1} . Описанная обработка названа *маятниковой*, так как температурный интервал термоциклирования находится вблизи температур перекристаллизации.

Среднетемпературную ТЦО, предназначенную для получения сорбитообразной структуры конструкционных углеродистых сталей, осуществляют путем быстрых нагревов до температуры на 30-50 °С.

Выше температуры A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 30-50 °С ниже точки A_{r1} , и далее в воде или масле.

Высокотемпературная ТЦО, или, как ее еще называют, *циклическая электротермическая обработка* (ЦЭТО) заключается в электронагреве со скоростью около 50°C/с до температуры полной аустенизации, охлаждении со скоростью 30-50°C/с до температуры 420-450°C, отвечающей температуре наиболее быстрого изотермического распада аустенита и выдержке при этой температуре. По окончании выдержки циклы повторяют, в последнем термоцикле осуществляют закалку из аустенитного состояния. ВТЦО предназначена для получения максимальной прочности при удовлетворительной пластичности.

Низкотемпературная ТЦО чугуна предусматривает быстрый нагрев до температуры на 30-50°C ниже температуры A_{c1} с последующей закалкой в воде или масле. Используют НТЦО для получения обратной микроликвации кремния в структуре чугуна.

Термоциклическая обработка без аллотропических превращений основана на возникновении и релаксации внутренних напряжений, обусловленных градиентами температуры, разницей теплофизических характеристик составляющих структуру фаз, а также на действии механизма растворение - выделение. Проводят ее в интервалах температур максимальной диффузионной подвижности атомов (ВТЦО) и температур, отвечающих интенсивному распаду пересыщенного твердого раствора предварительно закаленного материала (НТЦО). На процесс диффузии влияют повышенная концентрация точечных и линейных дефектов, а также постоянно действующие внутренние напряжения. ВТЦО используют в основном для растворения избыточных фаз, перераспределения химических элементов в твердом растворе, ее можно применять вместо закалки, гомогенизации, в отдельных случаях она заменяет мо-

дифицирование. НТЦО направлена на окончательное формирование свойств материала - дисперсионное твердение. Ее используют взамен старения [1].

Сочетание ТЦО с такими термическими и термомеханическими операциями, как закалка, отпуск, старение и другими, во многих случаях оказывается полезным, так как при этом появляется возможность дополнительного регулирования промежуточной (между циклами) структурой, напряженным состоянием, а также степенью развития характерных для ТЦО процессов

При ТЦО цветных металлов происходят измельчение составляющих структуру фаз, перераспределение химических элементов в твердом растворе, изменение в дислокационной структуре и т. д.

При этом необходимо оценивать степень развития диффузионных процессов при ТЦО, характер распределения химических элементов, микроструктуру, дислокационную структуру, а также некоторые другие показатели, отражающие состояние структуры материала [1].

Диффузионное перемещение атомов внедрения в матрице приводит к изменению размеров и формы избыточных фаз, внутри-объемному перераспределению химических элементов.

В работе исследовались образцы, вырезанные из прутков диаметром 15 мм и высотой 10 мм из сплава системы железо-никель 44НХТЮ.

Термическую обработку по экспериментальным режимам, приведенным в табл. 2, проводили в электропечи лабораторной SNOL 8.2/1100, предназначенной для термообработки разных материалов и изделий при температуре от 50 до 1100⁰С в воздушной среде в стационарных условиях.

Микроструктура шлифа исследовалась под цифровым оптическим микроскопом высокого разрешения Keyence VHX-1000 при увеличении x100, 500, 1000. Размер зерна определялся в соответствии с ГОСТ 5639.

ТЦО проводилась согласно схеме, предложенной В.К. Федюковым [1], и представленной на рис. 1, а, и схеме, в которой был расширен интервал термоциклирования и представленной на рис. 1, б.

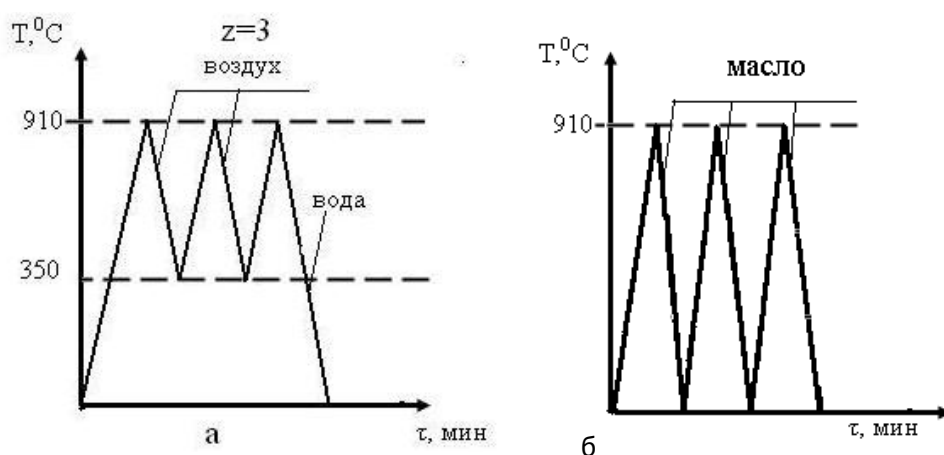


Рис. 3. Экспериментальные схемы ТЦО

Микроструктура сплава 44НХТЮ, обработанного по режимам ТЦО, согласно рис. 3, представлена на рис. 4.

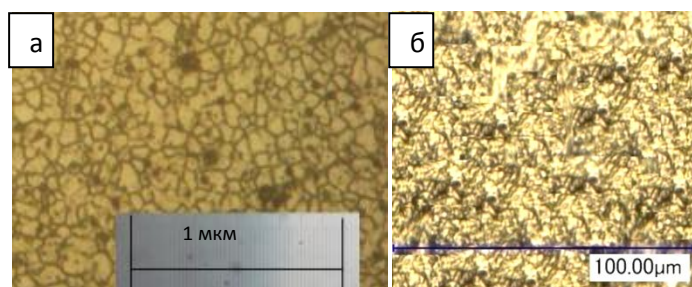


Рис. 4. Микроструктура сплава 44НХТЮ:

a – обработанного по схеме рис. 2, *a*; *б* – обработанного по схеме рис. 2, *б*

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что расширение интервала термоциклирования позволяет получить более однородную мелкодисперсную структуру и значительно интенсифицировать процесс.

Выводы

1. Расширение интервала термоциклирования при разработке схем ТЦО и их экспериментальном внедрении обработки позволяет эффективно улучшить микроструктуру элинварного сплава 44НХТЮ и значительно интенсифицировать процесс термической обработки.
2. Полученные результаты следует использовать для оптимизации режима термической обработки элинварного сплава 44НХТЮ.

-
1. **Федюкин, В.К.** Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.12.2013*

N.V. Redkina

DEVELOPMENT OF SCHEMES FOR THERMOCYCLIC PROCESSING OF ALLOY 44NХТЮ

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: This paper deals with schemes of thermocyclic processing.

Design/methodology/approach: Research is proposed based on microstructure analysis.

Findings: Thermocyclic processing to speed up the process of heat treatment and to grind grain.

Research limitation/implications: The present study provides a starting-point for further research in the thermocyclic treatment.

Originality/value: Moreover, the influence of the technological parameters of the thermocyclic treatment regime on the structural changes in alloy 44NХТЮ is discovered and the most effective regime of this treatment is recommended.

Key words: dispersion hardened alloy, thermocyclic processing, scheme, microstructure.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 616.831-005.4-008.9

А.Н. Мошкова¹, Т.Ф. Сергеева², Е.М. Хватова³, Н.П. Тежикова¹

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ ИШЕМИИ ПО АКТИВНОСТИ ИЗОФЕРМЕНТОВ КРЕАТИНФОСФОКИНАЗЫ МОЗГА МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Department of Biomedical Science, School of Medicine and Dentistry,
College of Health and Allied Sciences, The University of Dodoma²,
Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава России³

Цель: Анализ и оценка влияния ишемии на активность изоферментов креатинфосфокиназы нервной ткани и использование метода эмпирических зависимостей для прогнозирования расчетным способом возникающих изменений при длительном нарушении гемодинамики мозга.

Методология: В работе использован математический метод эмпирических зависимостей для оценки степени тяжести ишемии по активности изоферментов креатинфосфокиназы мозга.

Результаты и область их применения: Показана возможность прогнозирования расчетным способом активности цитоплазматической креатинфосфокиназы по активности ее митохондриальной изоформы, а также оценки изменения активности изоферментов при нарушении гемодинамики мозга разной продолжительности. Предлагаемые модели дают возможность прогнозировать пределы устойчивости мозга к гипоксии по динамике изменения активности изоферментов креатинфосфокиназы при нарушении мозгового кровообращения и контролировать развитие ишемического процесса.

Выводы: В результате проведенных исследований получена модель множественной регрессии, хорошо аппроксимирующая зависимость активности цитоплазматической креатинфосфокиназы от ее митохондриальной изоформы в разных условиях нарушения мозгового кровообращения.

Ключевые слова: креатинфосфокиназа, ишемия, регрессионная модель.

Введение

Повышение устойчивости мозга к повреждающим факторам является крайне актуальной задачей и привлекает специалистов различных профилей клинической и экспериментальной биологии и медицины [3, 9]. Метаболизм мозга имеет выраженный аэробный тип развития. Базисной для мозга является энергетическая функция митохондрий с высоким потреблением кислорода и окислительным синтезом АТФ [6].

Центральное место в процессах транспорта внутриклеточной энергии занимает креатинфосфокиназная система [4, 7, 8, 10]. В мозге креатинфосфокиназа (КФК) представлена двумя изоферментами: цитоплазматическим (цтКФК) и митохондриальным (миКФК).

Расстройство мозгового кровообращения приводит к нарушению структуры и функций мозга. Выяснение молекулярных механизмов действия ишемии на интегральные системы энергетического обмена имеет большое значение для разработки эффективных методов прогнозирования и оценки изменений, вызванных нарушением гемодинамики мозга.

Использование моделей множественной регрессии, объединяющих различные характеристики метаболических процессов мозга при гипоксических и ишемических повреждениях, позволяет получать достоверную информацию об энергетическом балансе мозга в экстремальных условиях жизнедеятельности и прогнозировать функциональное состояние нервной ткани при адаптации к повреждающим воздействиям окружающей среды.

Целью исследования является анализ и оценка влияния ишемии на активность изоферментов КФК нервной ткани и использование метода эмпирических зависимостей для прогнозирования расчетным способом возникающих изменений при длительном нарушении мозгового кровообращения.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что активность изоферментов КФК меняется в зависимости от продолжительности ишемического воздействия (табл. 1).

Таблица 1

Распределение активности изоферментов креатинфосфокиназы при ишемии головного мозга (Е/мг белка)

Условия эксперимента	Общая митохондриальная фракция	Цитоплазматическая фракция
Интактные животные	0,526±0,031 n = 35	0,589±0,049 n = 35
Ишемия мозга, 30 минут	0,418±0,023* n = 26	0,620±0,037 n = 26
Ишемия мозга, 3 суток	0,544±0,043** n = 14	0,591±0,044 n = 14
Ишемия мозга, 7 суток	0,528±0,046** n = 12	0,804±0,090* n = 12
Ишемия мозга, 30 суток	0,582±0,066** n = 9	0,720±0,055 n = 9

Примечание: * – статистически значимые различия по сравнению с интактными животными, $p < 0,05$ (по критерию Стьюдента);

** – статистически значимые различия по сравнению с 30-минутной ишемией, $p < 0,05$ (по критерию Стьюдента).

Установлено достоверное снижение активности миКФК в общей митохондриальной фракции на 21% в условиях острой ишемии (30 мин) по сравнению с интактными животными, активность цтКФК при этом значительно не изменяется, но растет относительно миКФК в 1,5 раза.

При увеличении продолжительности ишемии мозга (3, 7 и 30 суток) выявлен рост активности миКФК относительно 30-минутной ишемии, и ее величина соответствует активности интактных животных.

Активность цтКФК значительно не отличается от интактных животных при трехдневном нарушении гемодинамики головного мозга, однако, при 7-дневной ишемии активность цитоплазматического изофермента растет на 27% относительно нормы и в 1,52 раза превышает активность миКФК, что соответствует 30-минутной ишемии.

Дальнейшее увеличение продолжительности ишемии до 30 суток вызывает некоторое снижение активности цтКФК, но она остается повышенной относительно интактных животных, при этом наблюдается снижение отношения цтКФК к миКФК.

Таким образом, проведенные исследования показали, что изменение активности изоферментов КФК коррелирует с продолжительностью ишемического воздействия. Увеличение активности цтКФК в условиях нарушения мозгового кровообращения может быть связа-

но с выходом миКФК в цитоплазму за счет нарушения структуры наружной мембраны митохондрий в результате окислительного стресса [11].

Постоянная билатеральная перевязка общих сонных артерий индуцирует эффект подобно прекондиционированию. Это приводит к росту активности митохондриального изофермента при увеличении ишемического воздействия (3, 7 и 30 суток). Согласно исследованиям Л.Д. Лукьяновой (2011), формирование отсроченных механизмов адаптации к гипоксии является периодом экспрессии генов адаптации и генерации, что формирует новый спектр ферментов [1].

Применение методов математического анализа для исследования зависимости активности цитоплазматической КФК от митохондриальной позволило аппроксимировать эту зависимость в группе интактных животных и в группе экспериментальных особей функциями следующего вида:

$$y = 6,498x^3 - 7,4353x^2 + 3,5669x - 0,2232, \quad (1)$$

$$y(x, t) = (-0,000004t^3 + 0,0038t^2 - 0,6407t + 19,729)x^3 + (0,000005t^3 - 0,0044t^2 + 0,6909t - 16,436)x^2 + (-0,000002t^3 + 0,0017t^2 - 0,25t + 4,8121)x + (0,0000002t^3 - 0,0002t^2 + 0,025t - 0,0209), \quad (2)$$

где x – активность миКФК (Е/ мг белка); y – активность цтКФК (Е/ мг белка); t – время пребывания животных в состоянии ишемии, выраженное в часах.

Соответствие аппроксимирующих функций поставленной задаче доказывалось расчетом коэффициента детерминации R^2 , который соответствовал величине 0,84–0,96. Величина R^2 , близкая к 1, свидетельствовала о наличии тесной корреляционной связи между выбранными показателями, и представленные функции достаточно точно характеризовали зависимость между активностями выбранных показателей.

Прогностическая способность моделей (1) и (2) проверялась расчетом активности цтКФК по экспериментально установленной активности миКФК и сравнением полученного результата с дополнительно поставленными экспериментами (ишемия 18 ч и 14 дней) либо литературными данными. Близкое значение активности миКФК мозга (0,600 Е/мг белка) было получено J. Schlegel с сотрудниками (1988) [5].

Экспериментальные активности изоферментов КФК и результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Активность креатинфосфокиназы цитоплазматической фракции экспериментально установленная и рассчитанная по формулам в разных условиях ишемии

Условия эксперимента	Экспериментальная активность миКФК (x)	Экспериментальная активность цтКФК (y)	Теоретически заданные активности миКФК (x)	Рассчитанная активность цтКФК (y)	Относительная ошибка расчета
1	2	3	4	5	6
Интактные животные	0,526±0,031	0,589±0,049	0,526	0,526894	10,54%
	0,600*			0,604812	2,68%
Ишемия 0,5 ч (30 мин)	0,418±0,023	0,620±0,037	0,418	0,556911	Ср. 5,83%
			0,429	0,5734324	
			0,440	0,5921049	
			0,451	0,6130834	

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Ишемия 18-20,5 ч	0,379	0,573	0,418	0,4530371	Ср. 0,72%
	0,388	0,625	0,429	0,467546	
	0,615	0,669	0,517	0,6450175	
	0,631	0,758	0,528	0,6758536	
	0,641	0,549	0,539	0,7088295	
	Ср. 0,4666	Ср. 0,6348	0,55	0,7440105	
			0,561	0,7814615	
		Ср. 0,5058571	Ср. 0,639393671		
Ишемия 350-360 ч (14-15 суток)	0,4778	0,677	0,605	0,3808293	Ср. 6,52%
	0,491	0,686		0,4023672	
	0,644	0,600	0,616	0,5872239	
	Ср. 0,5376	Ср. 0,6543		0,6255015	
			0,625	0,8096758	
				0,8648441	
		Ср. 0,616	Ср. 0,611659		
Ишемия 600, 5-720 ч (24-30 суток)	0,582±0,066	0,720±0,055	0,627	0,8128206	Ср. 5,6%
			0,638	0,7085351	
			Ср. 0,6325	Ср. 0,76067785	

Примечание: * - Schlegel J. et al. (1988) [5].

Из табл. 2 видно, что максимальная относительная ошибка расчета активности цтКФК по сравнению с дополнительно поставленным экспериментом была меньше 20% (составляла 10,5%). Это соответствовало критерию «работающая модель» [2]. Следовательно, представленные математические модели могут быть использованы для прогнозирования активности цтКФК в мозге животных в разных условиях жизнедеятельности организма.

Таким образом, применение метода аппроксимации зависимостей между выбранными показателями позволило построить модели в виде функций (1) и (2), хорошо объединяющие активности изоферментов КФК в группе интактных животных и в условиях ишемии разной продолжительности. Предлагаемые модели дают возможность прогнозировать пределы устойчивости мозга к гипоксии по динамике изменения активности изоферментов КФК при развитии ишемической болезни и контролировать развитие ишемического процесса.

Применение математического моделирования в решении биологических задач позволяет получать информацию об энергетическом состоянии нервной ткани при неблагоприятных воздействиях окружающей среды, экономя экспериментальное время, дорогостоящие реактивы, сохраняя жизнь животным.

Библиографический список

1. Лукьянова, Л.Д. Современные проблемы адаптации к гипоксии. Сигнальные механизмы и их роль в системной регуляции // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2011. № 1. С. 2–18.
2. Мари, Дж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии – лекции о моделях. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
3. Erlykina, E. Role of Creatine Kinase – Hexokinase Complex in the Migration of Adenine Nucleotides in Mitochondrial Dysfunction / E. Erlykina, T. Sergeeva // Advances in the Preclinical Study of Ischemic Stroke, Edited by Maurizio Balestrino. Published by InTech, Croatia. 2012. Chapter 10. P. 193–214.
4. Koufen, P. Free radical-induced inactivation of creatine kinase: influence on the octameric and dimeric states of the mitochondrial enzyme (Mi_b-CK) / P. Koufen, A. Ruck, D. Brdiczka [et al.] // Biochem. J. 1999. Vol. 344. P. 413–417.

5. **Schlegel, J.** Native mitochondrial creatine kinase forms octameric structures. I. Isolation of two interconvertible mitochondrial creatine kinase forms, dimeric and octameric mitochondrial creatine kinase: characterization, localization, and structure-function relationships / J. Schlegel, B. Zurbruggen, G. Wegmann [et al.] // J. Biol. Chem. 1988. Vol. 263/ N 32. P. 16942–16953.
6. **Schurr, A.** Lactate, glucose and energy metabolism in the ischemic brain / A. Schurr // Int. J. Mol. Med. 2002. Vol. 10. N 2. P. 131–136.
7. **Tuon, L.** Mitochondrial respiratory chain and creatine kinase activities in mdx mouse brain / L. Tuon, C.M. Comim, D.B. Fraga [et al.] // Muscle Nerve. 2010. Vol. 41. N 2. P. 257–260.
8. **Vernoux, N.** Interfacial behavior of cytoplasmic and mitochondrial creatine kinase oligomeric state / N. Vernoux, T. Granjon, O. Marcillat [et al.] // Biopolymers. 2006. Vol. 81/ N 4. P. 270–281.
9. **Vlasov, T.D.** Ischemic preconditioning of the rat brain as a method of endothelial protection from ischemic/reperfusion injury / T.D. Vlasov, D.E. Korzhevskii, E.A. Polyakova // Neurosci Behav. Physiol. 2005. Vol. 35. N 6. P. 567–572.
10. **Wallimann, T.** Intracellular compartmentation, structure and function of creatine kinase isoenzymes in tissues with high and fluctuating energy demands: the “phosphocreatine circuit” for cellular energy homeostasis / T. Wallimann, M. Wyss, D. Brdiczka [et al.] // Biochem. J. 1992. Vol. 281. P. 21–40.
11. **Yerlykina, E.I., Sergeeva, T.F.** Enzymatic characteristic of creatine kinase system under conditions cerebral circulatory disorders / E.I. Yerlykina, T.F. Sergeeva // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2010. Vol. 149/ N 1. P. 14–17.

*Дата поступления
в редакцию 12.11.2013*

A.N. Moshkova¹, T.F. Sergeeva², E.M. Khvatova³, N.P. Tezhikova¹

**ESTIMATION OF SEVERITY DEGREE OF ISCHEMIA
BY THE ACTIVITY OF THE BRAIN CREATINE PHOSPHOKINASE ISOENZYMES
USING THE METHOD OF EMPIRICAL DEPENDENCES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev¹,
Department of Biomedical Science, School of Medicine and Dentistry,
College of Health and Allied Sciences, The University of Dodoma²,
Nizhny Novgorod State Medical Academy³

Purpose: Analysis and estimation of the influence of ischemia on the activity of the brain creatine phosphokinases isoenzymes and use of the method of empirical dependences for the prediction of the emerging changes in a long-term disorder of cerebral hemodynamics using a calculating method.

Methodology: The mathematical method of empirical dependences for estimation of severity degree of ischemia by the activity of the brain creatine phosphokinases isoenzymes has been used in the research.

The results and their application area: It has been demonstrated that there is a possibility of prediction of cytoplasmic creatine phosphokinase activity by the activity of its mitochondrial isoform using a calculating method. Estimation of the change of the isoenzymes activity due to cerebral ischemia of different duration has also been shown. There has been suggested the models of multiple regression permitting to predict stability limits of the brain to hypoxia by the dynamics of the change of activity of creatine phosphokinase isoenzymes in the disorder of cerebral circulation using a calculating method. These models make it possible to control the development of cerebral ischemia.

Conclusions: The present study suggested the model of multiple regression approximating the dependence of cytoplasmic creatine phosphokinase activity by the activity of its mitochondrial isoform in the different conditions of cerebral ischemia.

Key words: creatine phosphokinase, ischemia, regression model.

УДК: 519.862.2

Б.И. Гольденгорин, А.А. Кочетуrow

**АНАЛИЗ ФИНАНСОВЫХ РЫНКОВ СРЕДСТВАМИ МОДЕЛИ
О Р-МЕДИАНАХ**

НИУ Высшая школа экономики

Рассматривается новый метод анализа финансовых рынков. На основе цен акций, торгуемых на финансовых рынках, строится матрица расстояний между доходностями акций. Матрица расстояний служит основой для построения различных сетевых структур таких, как графы рынка, минимальные остовные деревья, клики, независимые множества и др. В работе рассматривается другая структура, которая получается при решении задачи о Р-Медиане. Данная структура позволяет найти стабильную кластеризацию на рынке. Кластеры образуются в результате решения дискретной задачи оптимизации, а также группами акций, суммарное расстояния в которых до центров минимально. Сравнение с различными структурами позволяет говорить о том, насколько сильны или слабы те или иные кластеры. Отмечены особенности полученных структур для различных фондовых рынков.

Ключевые слова: финансовые рынки, кластеризация, минимальное остовое дерево, задача о Р-Медиане.

Введение

Целью данной работы является нахождение устойчивых характеристик и закономерностей в структуре финансовых рынков. Для рассмотрения мы выбрали три рынка: рынок финансовых инструментов США, как самый крупный на планете; рынок России, в качестве представителя развивающихся экономик; и рынок Швеции, в качестве представителя стабильных экономик с большим показателем ВВП на душу населения.

В работе Мантегна (1999) предложено использовать сетевую структуру Минимального Остовного Дерева для анализа индекса Доу–Джонса. За основу берутся цены закрытия акций, входящих в индекс в 1999 году. Далее ищутся корреляций между доходностями – акций и на их основе рассчитываются расстояния между акциями. Если представить акции, как вершины, между которыми есть ребра с весами, равными расстояниям, то получается полный взвешенный граф. На этой структуре далее ищется Минимальное Остовное Дерево, которое используется для конечного анализа. Эта работа послужила основой для многих других исследователей, которые применяют похожие или отличные структуры для анализа финансовых рынков (Kullmann et al. 2000; Onella et al. 2002, 2003 a,b; Cukur, 2007; Kenett, 2010 a,b; Boginski et al. 2005,2006).

Последнее время большое внимание уделяется анализу рынков конкретных стран и/или выявлению закономерностей на этих рынках в периоды кризиса, роста или спада экономики (Jung et al., 2006; Huang et al., 2009; Tabak et al. 2010).

В данной работе проводятся исследования по сложившейся схеме, когда сначала необходимо найти меру близости между всеми объектами, которой может быть матрица корреляций или расстояний между акциями. Далее на основе этой меры строится (иногда используя некоторый порог) граф связей между акциями, и на нем уже ищется определенная структура (Минимальное Остовное Дерево, клики и прочее). Потом проводится анализ полученных структур и сравнение с другими подходами. Делаются выводы.

Данные. Для анализа используются цены закрытия в каждый торговый день по всем акциям, торгуемым на определенном рынке. Мы рассматривали 1000 торговых дней, что включает в себя более четырех календарных лет: с 3 сентября 2007 года по 15 сентября 2011 года. Так как многие акции часто не торгуются, то необходимо восполнять пропуски в данных, чтобы в дальнейшем посчитать корреляции. Если в конкретный торговый день данных по цене закрытия нет, то используется цена закрытия предыдущего дня. Если пропусков больше 20%, то такая акция из рассмотрения удаляется. Из-за такой фильтрации на россий-

ском рынке осталась всего 151 акция, на рынке Швеции – 266 акций, на рынке США – 3378 финансовых инструментов, среди которых большой процент рыночных фондов, часто отражающих базовые финансовые индексы (DJIA, S&P500, S&P100 и прочие) и являющиеся взвешенной суммой их составляющих акций.

Другая необходимая информация – это принадлежность акции к конкретной компании и то, в какой отрасли и в каком секторе эта компания работает. Как и многие другие авторы, мы полагаем, что вся необходимая информация о поведении акций содержится в данных, описанных ранее.

Нахождение матрицы корреляций. Мы предполагаем, что из восстановленных временных рядов можно найти парные корреляции между доходностями акций, и найденная матрица корреляций наиболее полно описывает рынок и взаимодействие между акциями.

По формуле

$$\rho_{ij} = \frac{E\{(R_i - E\{R_i\})(R_j - E\{R_j\})\}}{\sqrt{\text{var}(R_i)\text{var}(R_j)}} \quad (1)$$

мы находим все парные коэффициенты корреляции между доходностями акций i и j , где R_i – временной ряд, описывающий доходность акции i , который можно получить из цен закрытия той же акции по формуле $R_i(t) = \ln \frac{P_i(t)}{P_i(t-1)}$, где $P_i(t)$ – цена закрытия акции i в день t .

Теперь найденную матрицу корреляций мы будем использовать в качестве меры близости акций.

Задача о P-Медиане (P-Median Problem, PMP). Следующим шагом анализа является выбор структуры, которая будет вычисляться на полученной матрице корреляций. Идея для выбора структуры такова: необходимо разбить весь рынок на определенное количество компонент, или кластеров, внутри которых акции сильнее всего коррелируют с центральной акцией, или медианой. При фиксированном количестве медиан или кластеров получается формулировка задачи о P-Медиане.

Дадим математическую формулировку данной задачи в терминах финансовых рынков: Пусть X – множество из n акций, торгующихся на рынке, а $\rho = [\rho_{ij}]_{n \times n}$ – матрица коэффициентов корреляций между акциями. Под $d(i, S)$ будем понимать расстояние от акции i до множества акций $S \subseteq X$, равное максимальной корреляции между акцией i и акциями из S , то есть $d(i, S) = \max_{j \in S} (\rho_{ij})$. Теперь потребуем найти множество S из p акций такое, что оно максимизирует суммарное расстояние от всех акций до этого множества. Иными словами, решим задачу:

$$\max_{S \subseteq X, |S|=p} \left(\sum_{i=1}^n d(i, S) \right) = \max_{S \subseteq X, |S|=p} \left(\sum_{i=1}^n \max_{j \in S} (\rho_{ij}) \right). \quad (2)$$

Данная задача является частным случаем задачи о P-Медиане. Классические методы её решения работают с требованием минимальности объектной функции и неотрицательности матрицы издержек (в терминологии финансовых рынков – матрицы корреляций). Детальный обзор методов решения и областей применения задачи можно найти в следующих работах: Reese, 2006; Mladenovic [et al.], 2007. Данных требований можно легко добиться, если из матрицы корреляций получить вспомогательную матрицу $C = E - \rho$, где E – единичная матрица размерности n . Задача (2) сводится к следующей задаче минимизации:

$$\min_{S \subseteq X, |S|=p} \left(\sum_{i=1}^n \min_{j \in S} (c_{ij}) \right). \quad (3)$$

Задача о Р-Медиане принадлежит к классу полимиально - неразрешимых задач. Что означает, что при современных вычислительных мощностях невозможно точно решить данную задачу для рынка США, где приходится использовать эвристические методы, которые в силу специфики данных позволяют найти очень точные решения.

Решив задачу (3), мы получаем множество S медиан и соответствующую им кластеризацию на $P = |S|$ компонент. Например, для рынка России из 151 акции для $p = 10$ получаем соответствующую кластеризацию.

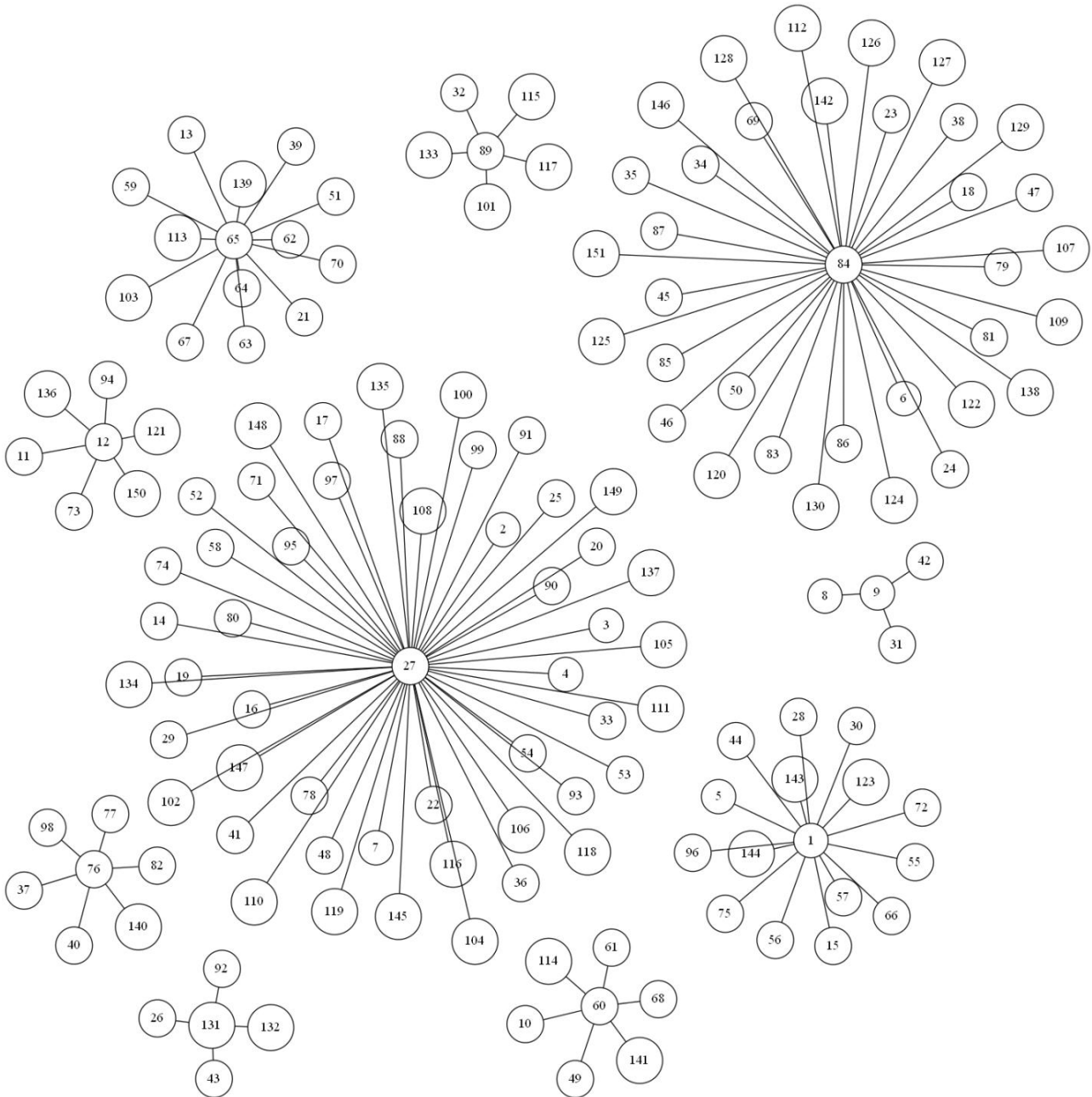


Рис. 1. Кластеризация для российского рынка при $p = 10$

Анализ кластеризации. Для начала заметим, что для рынков акций, в частности, и для любой матрицы корреляций в целом справедливо следующее утверждение:

$$f(p) = \max_{S \subseteq X, |S|=p} \left(\sum_{i=1}^n \max_{j \in S} (\rho_{ij}) \right) - \text{монотонно-неубывающая функция } \forall p = 1..n.$$

Действительно, допустим известно $f(k)$. Данному значению соответствует разбиение рынка на k кластеров. Теперь возьмем любой кластер, состоящий не из одной медианы (далее будем называть такие кластеры *нетривиальными*), выделим любую из акций (можно взять и саму медиану) в тривиальный отдельный кластер и сделаем её медианой этого кластера. Внутри полученного кластера суммарная корреляция равна 1, так как медиана полностью коррелирует с самой собой. А суммарная корреляция в кластере, из которого мы убрали акцию, уменьшилась на величину одного коэффициента корреляции (пусть это будет число a), не превосходящего единицу, так как $-1 \leq \rho_{ij} \leq 1, \forall i, j = 1..n$. Полная суммарная корреляция по всем кластерам изменилась на величину $1 - a \geq 0$, т.е. не уменьшилась. Так как такое разбиение на $k + 1$ кластеров является допустимым, то значение суммы корреляции, ему соответствующее, явно не больше максимума по всем возможным разбиениям, т.е. $f(k + 1)$.

Так же заметим, что максимум функции $f(p)$, достигающийся при $p = n$, равен n : все кластеры тривиальны, их n штук и корреляции внутри равны 1. Если положить за основу качества кластеризации значения функции $f(p)$, то при $p = n$ получим самую качественную кластеризацию, что не несет в себе никакой информации. Локальных экстремумов у данной функции тоже нет, поэтому необходим другой интуитивно-понятный метод нахождения оптимального количества кластеров: найдем такое $p = k$, при котором ещё нет тривиальных кластеров, а при $p = k + 1$ уже есть. Будем называть такое число кластеров «числом стабильной кластеризации», а соответствующее разбиение на компоненты – «стабильной кластеризацией».

На всех трех рынках наблюдаются следующие закономерности: во-первых, если $p = k$ – стабильное число кластеризации, то при всех $p > k$ есть тривиальные кластеры. Во-вторых, при стабильной кластеризации кластеры достаточно однородны: есть несколько самых крупных центральных кластеров, несколько среднего размера и остальные – небольшие, но относительно равные по размеру. При делении на большее количество компонент некоторые из средних или небольших по размеру (но никогда не самые крупные) начинают распадаться на отдельные тривиальные кластеры. Поэтому мы считаем, что стабильные числа кластеризации отражают действительную кластеризацию рынка. Для всех трех рынков числа стабильной кластеризации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Страна	Число стабильной кластеризации
Россия	15
США	31
Швеция	12

Сравнение структуры кластеризации с другими структурами. На той же самой матрице коэффициентов корреляций Boginski [et al.] предложили искать максимальные по размеру клики, т.е. полные подграфы с максимальным числом вершин. Для этого необходимо сначала сделать усечение данных по порогу $\theta \in [-1; 1]$, который преобразует матрицу корреляций в матрицу $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ из нулей и единиц, где $a_{ij} = \begin{cases} 1, \rho_{ij} \geq \theta, \\ 0, \rho_{ij} < \theta \end{cases}$. Таким образом, мы получаем граф связей между акциями, а далее действуем по следующей процедуре: мы находим клику наибольшего размера и удаляем её вершины из графа, потом выделяем следующую максимальную клику и снова удаляем, и так действуем до тех пор, пока не останутся клики максимального размера, равного 2. Все выделенные ранее клики мы запоминаем и сравниваем их со стабильной кластеризацией. Данную процедуру мы делаем для всех поро-

гов, начиная с 0.1 и заканчивая 0.9 с шагом 0.05. Для всех трех рынков и для всех рассмотренных порогов нам удалось найти следующие закономерности: все клики находятся внутри кластеров стабильной кластеризации, причем самая большая клика всегда находится внутри самого большого кластера. Размер кластера всегда больше размера клики, поэтому иногда несколько клик попадают в один кластер.

Так же мы сравнивали стабильную кластеризацию с другой структурой, которую мы назвали «Минимальный Остовной Лес». Такую структуру можно получить, если по алгоритму Крускала начинать искать Минимальное Остовное Дерево и отслеживать на каждом шаге количество компонент связности, которые есть по сути деревья, а их совокупность – лес. Зная максимальное количество компонент связности на протяжении всего алгоритма, мы снова пробегаем по алгоритму Крускала и останавливаемся тогда, когда количество компонент в первый раз равно максимально-возможному. Далее на рис. 2, 3 и 4 представлены Минимальные Остовные Деревья для рынков России, Швеции и США соответственно.

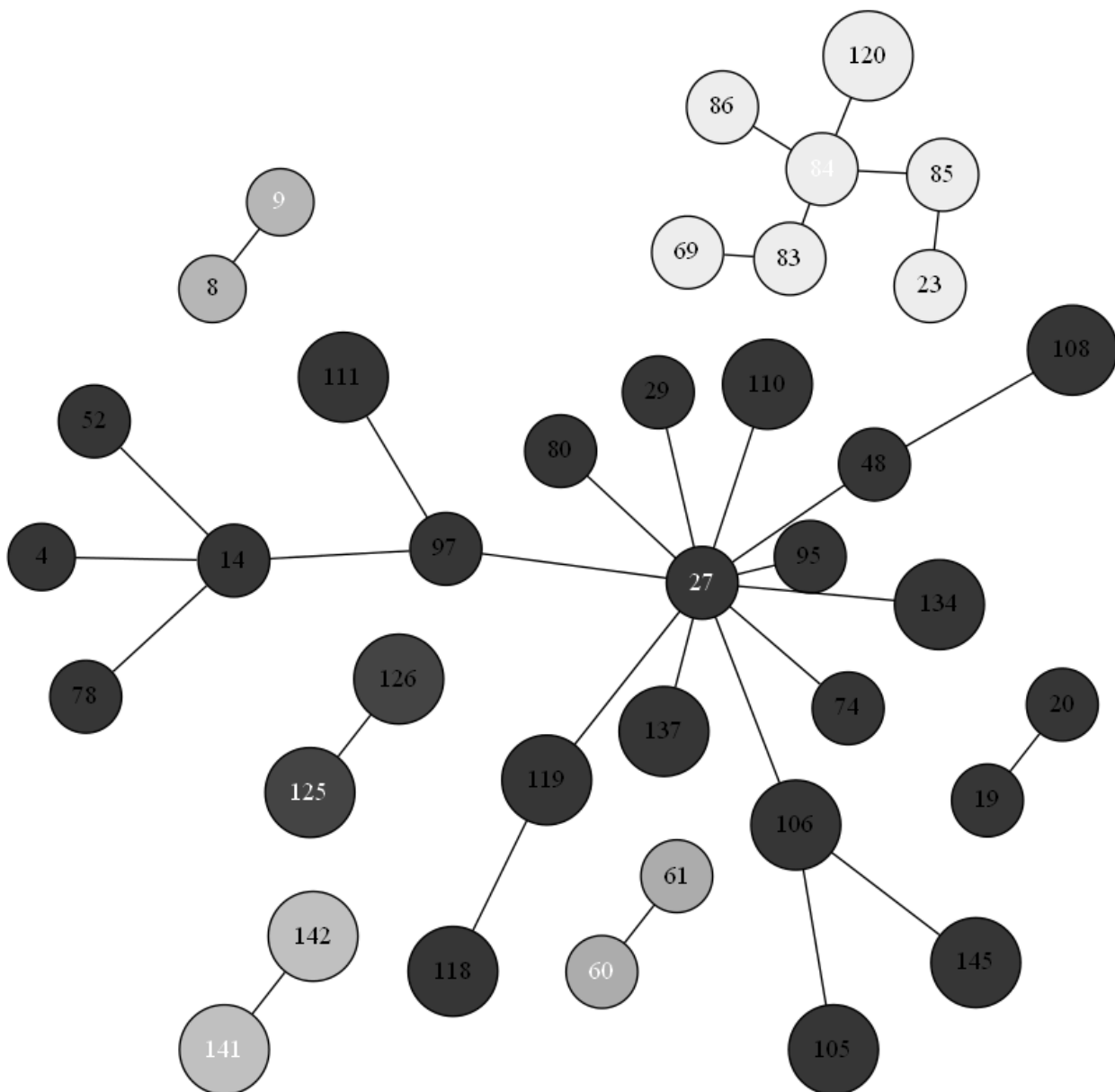


Рис. 2. МОЛ для рынка России

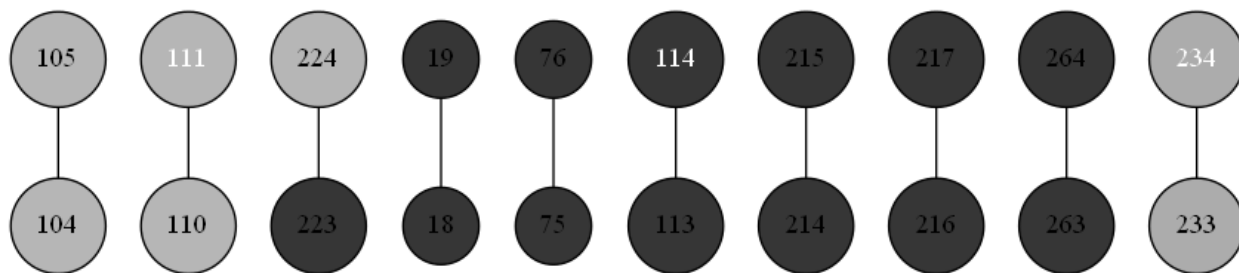


Рис. 3. МОЛ для рынка Швеции



Рис. 4. МОЛ для рынка США

На этих рисунках одинаковым цветом показаны акции, принадлежащие к одинаковым кластерам стабильной кластеризации. Если номер акции белого цвета, то эта акция – медиана соответствующего кластера. Для рынка России, где число стабильной кластеризации 15, а компонент в МОЛ – 7, видно, что каждая компонента соответствует отдельному кластеру, причем медиана этого кластера обязательно включена в эту компоненту и является её «центром» (из географических соображений), что говорит в пользу выбора критерия стабильной кластеризации. Так же некоторые из средних по размеру кластеров не включены в МОЛ, что означает, что эти кластеры не устойчивы. Для рынка Швеции (10 компонент МОЛ, 12 кластеров) мы наблюдаем похожую ситуацию: каждая компонента МОЛ соответствует одному кластеру, но один кластер может соответствовать нескольким компонентам. Также в силу того, что эти компоненты очень малы можно сделать вывод, что рынок Швеции более независим и однороден по сравнению с рынком России. Для рынка США (35 компонент МОЛ, 31 кластер) ситуация более сложная, но всё равно можно провести аналогию, что более крупным компонентам связанности соответствуют более крупные медианы.

Выводы

В работе введен критерий, указывающий на оптимальное количество кластеров на рынке. Сравнения с другими сетевыми структурами, показали, что стабильная кластеризация хорошо описывает рынок. Также с помощью сравнения различных сетевых структур можно делать вывод о том, насколько сильны или слабы те или иные кластеры и говорить, насколько независим рынок в целом.

Библиографический список

1. **Mantegna, R. N.** Hierarchical structure in financial markets // *European Physical Journal B*, 1999. № 11. P. 193–197.
2. **Kullmann, J L.** Mantegna, «Identification of clusters of companies in stock indices via Potts superparamagnetic transactions / L.J. Kullmann, R. N. Kertesz // *Physica A*. 2000. № 287. P. 412–419.
3. **Onnela, J.-P.** Asset Trees and Asset Graphs in Financial Markets / J.-P. Onnela [et al.] // *Physica Scripta*. 2003. № T106. P. 48–54.
4. **Onnela, J.-P.** Dynamic asset trees and Black Monday / J.-P. Onnela [et al.] // *Physica A*. 2003. № 324. P. 247–252.
5. **Onnela, J.-P.** Dynamic asset trees and portfolio analysis / J.-P. Onnela [et al.] *The European Physical Journal B*. 2002. № 30. P. 285–288.
6. **Cukur, S.** Cross correlations in an emerging market financial data / S. Cukur, M. Eryigit, R. Eryigit, *Physica A*. 2007. № 376. P. 555–564.
7. **Kenett, D. Y.** Dominating Clasp of the Financial Sector Revealed by Partial Correlation Analysis of the Stock Market / D. Y. Kenett [et al.] // *PLoS ONE*, 2010. Т. 5. № 12.
8. **Kenett, D. Y.** Dynamics of Stock Market Correlations / D. Y. Kenett [et al.] // *AUCO Czech Economic Review*. 2010. № 4. P. 330–340,
9. **Boginski, V.** Mining market data: A network approach / V. Boginski, S. Butenko, P. M. Pardalos // *Computers & Operations Research*. 2006. № 33. P. 3171–3184.
10. **Boginski, V.** Statistical analysis of financial networks / V. Boginski, S. Butenko, P. M. Pardalos *Computational Statistics & Data Analysis*. 2005. № 48. P. 431–443.
11. **Jung, W.-S.** Characteristics of the Korean stock market correlations / W.-S. Jung [et al.] // *Physica A*. 2006. № 361. P. 263–271.
12. **Huang, W.-Q.** A network analysis of the Chinese stock market / W.-Q. Huang, X.-T. Zhuang, S. Yao *Physica A*. 2009. № 388. P. 2956–2964.
13. **Tabak, B. M.** Topological properties of stock market networks: The case of Brazil / B. M. Tabak, T. R. Serra и D. O. Cajueiro // *Physica A*. 2010. № 389. P. 3240–3249.

14. **Reese, J.** Solution methods for the p-Median problem: an annotated bibliography // Networks. 2006. Т. 3. № 48. P. 125–142.
15. Mladenovic, N. The p-Median problem: a survey of metaheuristic approaches / N. Mladenovic [et al.] // European Journal of Operational Research. 2007. № 179. P. 927–939.

*Дата поступления
в редакцию 12.11.2013*

B.I. Goldtngorin, A.A. Kocheturov

**THE ANALYSIS OF THE FINANSIAL MARKETS BY MEANS
OF THE R–MEDIAN MODEL**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: In this paper we consider a new approach of analyzing financial markets.

Design/methodology/approach: We build a distance matrix between stock returns based on prices of these stocks. The matrix is an initial point to build different network structures such as Market Graphs, Minimum Spanning Trees, Cliques, Independent Sets, etc.

Findings: We consider another structure obtained by means of the P–Median Problem.

Research limitation/ implications: The structure allows finding a stable clustering of a market. The clusters are obtained by the solution of discrete optimization problem and are formed by a groups of stocks with minimal total sum of distances from elements of groups to their centers.

Originality/value: Comparison between different structures allows estimation the strength of a certain cluster. Peculiarity of constructed structures for different stock markets are noted.

Key words: topographical analysis, traffic collision, TRC, traffic accident, TRA, GIS, Geographic Information System, an interactive map.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Тел. 8 312 4367372
E-mail: rio@nntu.nnov.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 5 (102)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, tretjakova@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 30.12.2013. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 47, 25. Уч.-изд. л. 42,0. Тираж 300 экз. Заказ
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»