

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

---

УДК 621.785.363 (088.8)

**В.И. Астащенко, А.И. Швеёв, Т.В. Швеёва, И.Н. Халиков**

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ**

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны

Проведены комплексные исследования механических и технологических свойств сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ. Показаны преимущества новых сталей в части повышения статических и динамических характеристик. Рекомендовано использование таких сталей для изготовления тяжело нагруженных деталей – коленчатых валов и шатунов двигателя. Показана эффективность применения стали 18ХГР для зубчатых колес.

*Ключевые слова:* термообработка, сталь, деформация, структура, твердость.

В связи с ускоренным развитием техники крайне актуальными встают вопросы повышения надежности и долговечности деталей машин. Особенно возрастает роль такой задачи в настоящее время, так как развитие основных отраслей промышленности идет в направлении повышения нагрузок, температур и использования агрессивных сред, в которых работает деталь. Возможным решением поставленной задачи является разработка, исследование и внедрение новых высокопрочных сталей.

#### **Методика работы**

Металлографические исследования выполнены с использованием микроскопов «Эпитип-2» и «Неофот-2» при увеличениях  $\times 100$  -  $\times 1000^*$ . Загрязненность стали неметаллическими включениями оценивали по ГОСТ 1778-70, размер зерна определяли методом окисления (стали АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ) и методом цементации (сталь 18ХГР) по ГОСТ 5639-82.

Испытания на растяжения и ударную вязкость проводили на разрывной машине ZD-20 и маятниковом копре PSW-30 в соответствии с ГОСТ 1497-61 и ГОСТ 9454-60. Образцы изготавливали из заготовок, отобранных из проката по ГОСТ 7564-73 и прошедших термическую обработку: для сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ - закалка с температуры 930°C в масло и отпуск при 630°C; для стали 18ХГР – закалка с 860°C в воду и отпуск при 200°C с охлаждением на воздухе. Для определения твердости применяли приборы ТШ-2М и ТК-2М, а микротвердости – прибор «Дуримет». Усталостная прочность на изгиб коленчатых валов оценивалась путем нагружения щеки переменным изгибающим моментом, а на кручение – путем нагружения шатунной шейки переменным крутящим моментом. Испытания шатунов проводили по знакопеременному циклу нагружения с воспроизведением гидродинамики в подшипнике скольжения кривошипной головки при растягивающем напряжении от 4 до 8 тн и двойной амплитуде цикла от 14 до 24 тн. Обрабатываемость резанием оценивалась в лабораторных и производственных условиях на автоматических

линиях при механической обработке заготовок коленчатого вала, шатунов и зубчатых колес двигателя и мостов автомобиля.

### Результаты исследования

В табл. 1 представлено содержание химических элементов в стали АЦ40Х2НМАФ, выплавленной в мартеновской печи, обработанной синтетическим шлаком и прокатанной на квадрат 154±2 мм на Серовском металлургическом заводе; и в стали АЦ30Х3НМАФБ, выплавленной и прокатанной на круг 70 мм в ПО «Ижсталь». Эти марки стали упрочнены за счет легирования азотом, ванадием и ниобием.

Таблица 1

#### Химический состав сталей

Сталь	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	V	P	S	Nb
АЦ40Х2НМАФ	0,37	0,20	2,12	0,72	0,45	0,11	0,11	0,025	0,007	-
АЦ30Х3НМАФБ	0,31	0,24	2,54	0,74	0,40	0,20	0,07	0,021	0,011	0,03

В состоянии поставки загрязненность стали АЦ40Х2НМАФ оксидами и сульфидами не превышала 2,5 балла, а стали АЦ30Х3НМАФБ – оксидами не более 3 балла, сульфидами – 2 балла и нитридами – 1 балл. Механические свойства термически обработанной стали находятся на высоком уровне и выше, нежели чем у серийно используемых сталей 42ХМФА и 40ХН2МА для коленчатых валов и шатунов двигателя (табл. 2).

Таблица 2

#### Механические свойства сталей

Сталь	Показатели свойств					
	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ
АЦ30Х3НМАФБ шатуны	1210 (1000)	1080 (850)	12,5 (12)	56 (55)	110 (100)	334 (287)
АЦ40Х2НМАФ коленчатый вал	1110 (850)	1030 (730)	12,5 (12)	54,0 (42)	88 (80)	321 (255)

**Примечание.** В скобках указаны минимальные значения свойств в состоянии поставки для стали 40ХН2МА (шатуны) по ГОСТ 4543-71 и для стали 42ХМФА (коленчатый вал) по ТУ 14-1-5520-2005.

В процессе изготовления поковок, предусматривающего индукционный нагрев заготовок до температуры 1260±20°С, пластическую деформацию и термическую обработку, установлена технологичность сталей с нитридванадиевым упрочнением на данных стадиях обработки. Оптимальный уровень прочностных и пластических свойств сталей получен в результате термической обработки поковок, включающей аустенизацию при температуре 930±20°С, закалку в масло и отпуск при 630±20°С с последующим охлаждением в масло. Более высокая температура (930°С) нагрева сталей под закалку по отношению к сталям 42ХМФА и 40ХН2МА (860°С) объясняется механизмом нитридванадиевого упрочнения. Однако такое повышение температуры может привести к уменьшению межремонтных периодов термических агрегатов и снижению стойкости жаропрочных материалов.

Механическая обработка заготовок шатуна в количестве 1000 шт. на автоматической линии показала высокую технологичность стали АЦ30Х3НМАФБ на различных операциях резания. Твердость заготовок находилась в пределах 255-302 НВ, а микроструктура соответствовала сорбиту отпуска (табл. 3).

Анализ обрабатываемости заготовок коленчатого вала показал, что основной лимитирующей стадией процесса резания являются операции глубокого сверления,

характеризуемые показателем  $L/D > 3$  ( $L$  - длина отверстия,  $D$  - диаметр сверла). Затруднение при механической обработке выразилось в налипании материала заготовок на режущий инструмент и образованием плохо удаляемой стружки из зоны резания, что служило причиной поломки сверл  $\varnothing 5,5 \div 10,0$  мм. Учитывая взаимосвязь обрабатываемости резанием со свойствами материала, параметрами режима резания и конструктивных особенностей инструмента, исследована возможность улучшения обрабатываемости на операциях сверления заготовок из комплексно легированной термоулучшаемой стали АЦ40Х2НМАФ. Установлено, что оптимальными параметрами при сверлении заготовок из новой стали являются:

- для сверл  $\varnothing 5,5$  мм и  $\varnothing 5,7$  мм – подача 0,1 мм/об при скорости 660 об/мин,
- для сверл  $\varnothing 8,5$  мм и  $\varnothing 8,7$  мм – подача 0,17 мм/об при скорости 400 об/мин,
- для сверл  $\varnothing 9,0$  мм и  $\varnothing 10,0$  мм – подача 0,15 мм/об при скорости 360 об/мин.

Основное внимание при опытно-промышленном апробировании уделено показателям служебных свойств деталей – их усталостной прочности. Стендовые испытания деталей из опытной стали показали, что пределы выносливости коленчатых валов составляют: на изгиб – 1000 кг·м, на кручение – 900 кг·м, что превышает эти показатели свойств для применяемой в настоящее время стали 42ХМФА (900 и 800 кг·м соответственно).

Интерес представляют результаты усталостных испытаний шатунов, что объясняется дополнительной разработкой новой технологии термической обработки стали АЦ30Х3НМАФБ, структура и твердость деталей указаны в табл. 3.

Таблица 3

## Свойства стали АЦ30Х3НМАФБ после термической обработки

$T_{\text{ауст}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Режим термообработки		Охлаждающая среда	Структура	Твердость, НВ
	Охлаждающая среда	$T_{\text{отп}} \text{ } ^\circ\text{C}$			
940	Воздух	650	Воздух	Сорбит	285
930	Масло	650	Масло	Сорбит	302
930	Воздух	705	Масло	Сорбит	278
950 (температура окончания штамповки)	Воздух (2-5°С/с) на конвейере	705	Воздух	Сорбит + Феррит	255

Видно, что во всех случаях в стали формируется сорбитная структура. Незначительное снижение твердости наблюдается у деталей, термическая обработка которых включала реализацию ковочного тепла заготовок. Результаты стендовых испытаний деталей показали, что предел усталости всех опытно-промышленных деталей составил на сжатие 6 тн при двойной амплитуде цикла 24 тн, что на 50% превышает аналогичные показатели деталей, изготовленных из стали 40ХН2МА. Следует также отметить, что наличие дробенаклепа поверхности деталей дополнительно повышает выносливость шатунов, что подтверждено металлографическими исследованиями, изучением микротвердости поверхности и усталостными испытаниями.

Особое значение приобретают вопросы выбора сталей для зубчатых колес. Шестерни ведущих мостов грузовых автомобилей испытывают в эксплуатации целый спектр изменяющихся статических и динамических нагрузок. Широко применяемые стали, такие как 20ХГНМТА, 25ХГТ и другие [1], приводят к преждевременному выходу из строя деталей из-за поломки зубьев. Одной из причин низкой стойкости шестерен служит высокая твердость в сердцевине детали, оцениваемая, согласно нормативным документам, на расстоянии 2/3 от вершины зуба по его осевой линии.

В подтверждение изложенному убедительно свидетельствуют и результаты стендовых испытаний деталей с различной твердостью в сердцевине зуба шестерни (табл. 4).

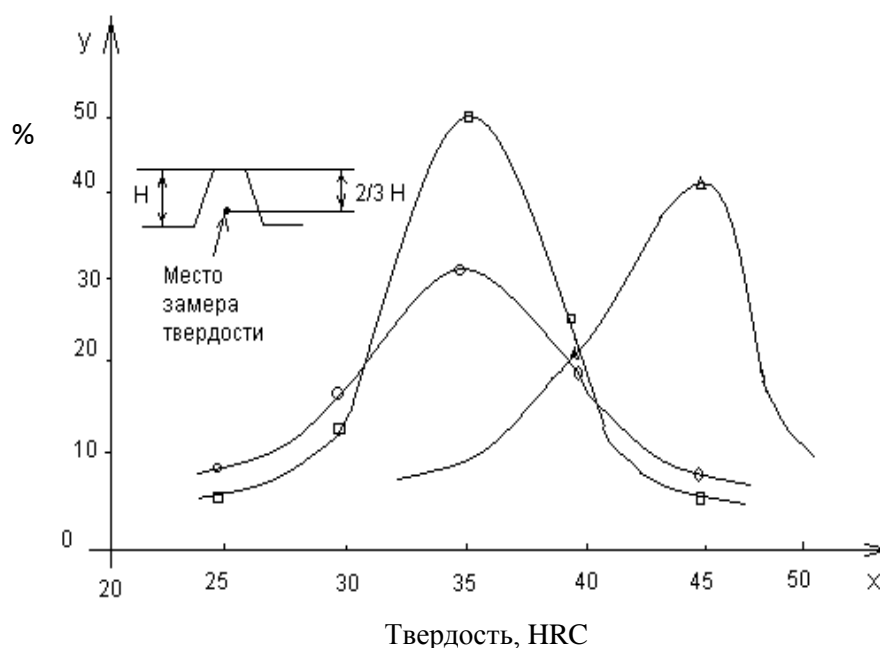
Таблица 4

**Влияние твердости сердцевины зуба шестерни на стойкость при стендовых испытаниях (сталь 20ХГНМТА)**

№ п/п	Прокаливаемость $\Pi_{9}^{HRC}$	Твердость, HRC		Глубина* цементованного слоя	Стойкость детали, ч
		поверхности	сердцевины		
1	43,5	61,5	44,0	1,20	2,55
2	39,0	61,5-62,0	36,0	1,15	4,10

**Примечание.** \* Глубина цементованного слоя определена во впадине зуба – наиболее опасном сечении.

Ключевое влияние на этот показатель свойств, безусловно, оказывает прокаливаемость стали. Очевидно, чем выше прокаливаемость и меньше геометрические параметры изделия, тем выше твердость в сердцевине детали. Установлено, что твердость в сердцевине зуба шестерен с модулем 5 мм после ХТО на 8-10 HRC выше, чем твердость определенная на рекомендуемом расстоянии 9 мм от охлаждаемого торца стандартного образца по ГОСТ 5657-69 (рис. 1). Только на шестернях с модулем более 8,0 мм достигается аналогичная величина твердости, что и прокаливаемость стали на указанном расстоянии от торца образца [2].



**Рис. 1. Частота (%) распределения твердости сердцевины зуба шестерен с различным модулем после ХТО. Сталь 20ХГНМТА. Количество партий деталей – 85 шт:**

○ – исходное состояние стали ( $\Pi_{9}^{RC}$ ); Δ – модуль  $m=5$  мм; □ – модуль  $m=8.7$  мм

Данные результаты свидетельствуют о необходимости регламентирования прокаливаемости стали на различном расстоянии от охлаждаемого торца образца с учетом масштабного фактора детали. Для шестерен первоочередным условием является модуль зуба.

В настоящее время успешно завершено испытание экономнолегированной стали марки 18ХГР, для мелко- и крупномодульных шестерен коробки передач и главных мостов автомобиля «КАМАЗ». К новой стали предъявляются требования по химсоставу и прокаливаемости (табл. 5, 6). Как показали исследования, механические свойства стали превышают значения, предусмотренные для стали 20ХГНМТА (табл. 7), которые достигаются за счет одновременного модифицирования сплава бором и алюминием. Опытная

сталь выплавляется на Оскольском электрометаллургическом комбинате и прокатаывается на Ø90 мм из непрерывно-литой заготовки сечением 360×300 мм (степень деформации составила более 6,0).

Таблица 5

## Химический состав сталей

Сталь	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti (B)	Al	S	P
20ХГНМТА	0,18-0,23	0,17-0,37	0,8 – 1,10	0,8-1,1	0,8-1,1	0,2-0,3	0,03-0,09	-	≤ 0,025	≤ 0,025
18ХГР*	0,14-0,20	0,15-0,40	1,10-1,35	1,1-1,35	0,15-0,30	0,04-0,12	0,002 (0,001-0,003)	0,02-0,05	0,020-0,035	≤ 0,025

**Примечание.** \*Суммарное содержание Mn, Cr, Ni и Mo должно быть от 2,5 до 3,05%.

Таблица 6

## Прокаливаемость сталей

Сталь	Твердость (HRC) на расстоянии от закаленного торца, мм							НТД
	5	9	10	15	25	40	50	
20ХГНМТА	-	30-40	-	24-38	-	≤ 25	-	ТУ 14-1-5509-2005
18ХГР	37-43	-	33-39	-	25-31	-	≥ 22	ТУ 14-1-5561-2008

Таблица 7

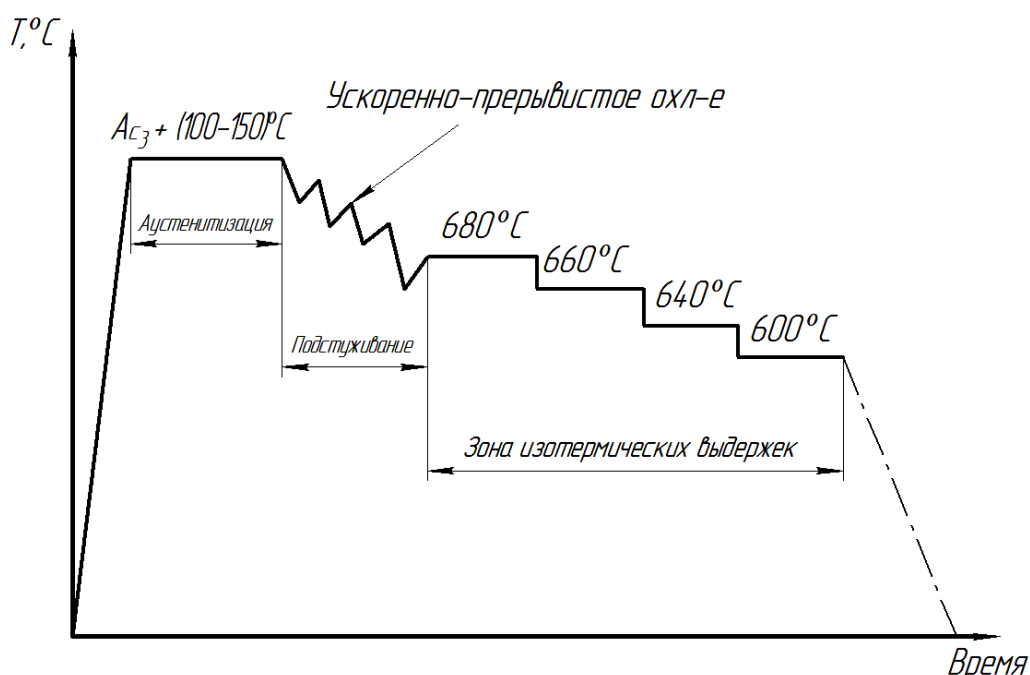
## Механические свойства сталей

Сталь	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ
20ХГНМТА	≥ 1300	≥ 1100	≥ 11	≥ 50	≥ 78	-
18ХГР *	1485	1350	13,5	59	94,5	363

**Примечание.\*** Химический состав плавки: С-0,18%; Si-0,28%; Mn -1,21%; Cr -1,22%; Ni – 0,26%; Мо – 0,09%; В -0,002%; S – 0,029% и Р – 0,018%.

Для обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием заготовок на автоматических линиях они после горячей объемной штамповки подвергаются изотермическому отжигу (рис. 2). После термической обработки в стальных заготовках стабильно формируется феррито-перлитная структура, а величина твердости находится в пределах 163-197 НВ. Обязательным условием при выборе параметров отжига является необходимость ускоренно-прерывистого циклического охлаждения заготовок с температуры аустенитизации до температуры максимальной скорости перлитного превращения [3] и проведение изотермической выдержки со ступенчатым понижением температуры от 680 до 600°С [4].

Важным условием для сталей подвергаемым горячим видам обработки является размер аустенитного зерна, который влияет на усталостную прочность деталей. Известно, что при крупнозернистом строении усталостная прочность на изгиб в ножке зуба снижается на 25%, а на кручение – на 40%. Для стали 18ХГР температурная зависимость показала, что порог роста зерна в ней находится при температуре 940°С и выше. Данная информация свидетельствует об ограничении температуры аустенитизации при отжиге заготовок и температуры насыщения деталей при цементации в процессе химико-термической обработки.



**Рис. 2. Схема унифицированной технологии при производстве заготовок из цементуемых легированных сталей**

Высокие показатели свойств достигнуты на цементованных шестернях: твердость поверхности 59-62 HRC; эффективная глубина насыщения (до 610 HV) составила  $0,7 \div 0,8$  мм; количество остаточного аустенита в упрочненном слое не превышало 25%; содержание углерода на расстоянии 0,1 мм от поверхности составляло 0,7-0,85%; твердость в сердцевине – 37-38 HRC; величина зерна – 7-8 балл; динамическая сила разрушения зуба с модулем 8,7 мм превысила 54 кН при норме не ниже 49 кН.

### Выводы

1. Высокие показатели механических свойств сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ, полученные при статических и динамических испытаниях, позволяют рекомендовать их для изготовления тяжелонагруженных деталей – коленчатых валов и шатунов автомобиля.

2. Экономнолегированная цементуемая сталь 18ХГР показала высокую технологичность, обладает необходимым уровнем механических свойств и с успехом может применяться для шестерен грузовых автомобилей.

3. Установлена возможность закалки на воздухе шатунов из стали АЦ30Х3НМАФБ, с температуры окончания штамповки ( $\sim 950^\circ\text{C}$ ) с обеспечением высокого уровня её свойств после высокого отпуска.

### Библиографический список

1. **Лахтин Ю.М.** Термическая обработка в машиностроении: справочник / Ю.М. Лахтина; под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
2. **Астащенко, В.И.** Технологические методы управления структурообразованием стали при производстве деталей машин / В.И. Астащенко, В.Г. Шибиков. – М.: Academia, 2006. – 328 с.
3. **Пат. № 1301856** Российская Федерация, МКИ<sup>3</sup> С21Д <sup>1</sup>/<sub>78</sub>. Способ термической обработки заготовок / Астащенко В. И., Янцен Г. И., Ивановский С. В.; заявитель и патентообладатель Камское объединение по производству большегрузных автомобилей. - №4015708/22-02; заявл. 14.11.85.

4. Пат. №1534067 Российская Федерация, МКИ<sup>3</sup> С21Д<sup>1</sup>/<sub>26</sub>. Способ термической обработки заготовок/ Асташенко В. И., Янцен Г. И. [и др.]; заявитель и патентообладатель Камское объединение по производству большегрузных автомобилей.-№4438814/23-02; заявл. 08.06.88; опубл. 07.01.90 Б.И. №1.

*Дата поступления  
в редакцию 20.06.2013*

**V.I. Astashchenko, A.I. Shveev, T.V. Shveeva, I.N. Halikov**

**PERSPECTIVE BECAME FOR THE TYAZHELOKONSTRUKTSIONNYKH  
OF DETAILS OF THE CAR**

Naberezhnochelninsky Institute (branch)Kazan (Volga) Federal University,  
Naberezhnye Chelny

Complex researches of mechanical and technological properties of steels AC40H2NMAF and AC30H3NMAFB are carried out. Advantages of new steels and a part of increase static and dynamic characteristics are shown. Use of such steels for manufacturing of hard loaded details-cranked of shaft and engine rods is recommended. Efficiency of application of a steel 18HGR for cogwheels is shown.

*Key words:* thermal processing, steel, deformation, structure, hardness.