

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
д.ф.-м.н., доцент


Гарминенко
Александр Викторович
«30» 11 2023 г.


ОТЗЫВ

ведущей организации **Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»** на диссертационную работу Прусова Евгения Сергеевича «Развитие научных основ создания литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов для отливок ответственного назначения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – Литейное производство

Актуальность темы диссертационной работы

Задача повышения эксплуатационных характеристик литых изделий является для машиностроительной отрасли одной из ключевых, поскольку ее эффективное решение в значительной степени определяет конкурентоспособность промышленных предприятий в условиях возрастающих требований к качеству, надежности и производительности различных машин и механизмов. Выполнение указанных требований тесно связано с обеспечением непрерывного повышения качества продукции литейного производства, что, в свою очередь, обуславливает необходимость создания новых материалов с повышенным уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств. Перспективным классом конструкционных и функциональных материалов для отливок ответственного назначения являются литые алюмоматричные композиты, отличающиеся высокой удельной прочностью, жёсткостью, твёрдостью, демпфирующей способностью, износостойкостью в широких пределах нагрузок. Практика показывает, что применение литых композиционных материалов в качестве замены традиционных сплавов на основе черных и цветных металлов позволяет не только существенно повысить ресурс работы и эксплуатационную надежность машин и агрегатов, но и в ряде случаев создавать принципиально новые узлы и конструкции.

Вместе с тем, несмотря на значительные потенциальные преимущества от внедрения литых композиционных материалов в различных отраслях промышленности, широкое освоение технологических процессов их получения на производственных предприятиях сдерживается вследствие отсутствия надежных практических рекомендаций по выбору компонентных составов алюмоматричных композитов и режимов их плавки и литья, обеспечивающих изготовление отливок стабильного качества. В этой связи тема диссертационной работы Прусова Е.С., посвященной созданию методологических принципов проектирования литых комплексно-армированных композиционных материалов и разра-

ботке технологических процессов их получения, является актуальной для современного литейного производства.

Структура и содержание работы

Представленная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 440 наименований и двух приложений, изложена на 365 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков и 23 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описана методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, отражен личный вклад соискателя и обозначено соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.6.3 Литейное производство.

В **первой главе** обобщены сведения о литых композиционных материалах и технологических процессах их получения. Представлена общая характеристика и обозначены перспективные области применения литых композиционных материалов. Детализирован вклад отечественных и зарубежных научных коллективов в развитие теории и практики получения металломатричных композитов и литых заготовок из них. Рассмотрено влияние армирования частицами на физико-механические и трибологические свойства литых композиционных материалов. Систематизированы данные по технологическим процессам получения литых композиционных материалов и разработана классификация известных металлургических методов их синтеза по принципу реализации схемы армирования (экзогенное, эндогенное, комплексное). Показано, что, несмотря на положительные мировые тенденции в области производства и внедрения литых композиционных материалов, темпы роста объемов их использования в России не адекватны предоставляемым технико-эксплуатационным возможностям, что обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования технологий плавки и литья металломатричных композитов. Проанализированы различные варианты реализации стратегий гибридного армирования металломатричных композитов и обозначены преимущества такого подхода. Результаты проведенного обзора подтвердили актуальность разработки научных принципов проектирования и получения литых комплексно-армированных композиционных материалов, содержащих экзогенные частицы и эндогенные фазы реакционного или кристаллизационного происхождения.

Во **второй главе** представлена предложенная методология проектирования литых композиционных материалов. Сформулированы требования к матричным сплавам и легирующим элементам при получении композиционных материалов металлургическими методами. Дано обоснование использования алюминия в качестве основы матричного сплава для металломатричных композитов триботехнического назначения. Проведена расчетная оценка изменения термодинамической активности алюминия при добавлении легирующих элементов в системе «матричный металл – керамическая фаза», что позволило установить наиболее благоприятные элементы с позиций их влияния на взаимодействие экзогенных частиц с расплавом. Разработаны критерии выбора армирующих компонентов, учитывающие показатели совместимости матрицы и потенциальных армирующих фаз, и

проведен сопоставительный анализ различных химических соединений для определения приоритетных направлений экспериментального поиска, в том числе с учетом экзогенного и эндогенного их происхождения.

В **третьей главе** представлены результаты исследований разработанных комплексно-армированных композиционных материалов с эндогенными фазами реакционно-го происхождения. С применением специализированных программных комплексов вычислительной (св-во о рег. ПО ЭВМ №2016615367) и геометрической (Thermo-Calc) термодинамики проведен анализ процессов межфазного взаимодействия компонентов композитов, по результатам которого даны оценки возможного состава продуктов на межфазных границах (св-ва о рег. БД №№ 2019620783, 2019620841, 2019620807), а также вероятности интенсификации или подавления деградации экзогенных фаз при добавлении легирующих элементов. Разработаны технологические схемы ввода порошковых смесей в матричные расплавы путем механического замешивания с помощью импеллера и в брикетированном виде (патенты РФ №№ 2492261, 198414). Проведен анализ факторов, влияющих на жидкотекучесть литых композиционных материалов, и предложена аналитическая форма уравнения для их описания. Получены новые экспериментальные данные о формировании эндогенных фаз Al_3Ti при получении моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов, изучены структура и фазовый состав полученных композитов. Показана возможность управления структурно-морфологическими характеристиками эндогенных фаз реакционного происхождения в процессах плавки и литья композиционных материалов.

В **четвертой главе** приведены результаты исследований литых композиционных материалов, содержащих эндогенные фазы кристаллизационного происхождения и синтезированных в моноармированном, гибридном и комплексно-армированном вариантах. По методологии CALPHAD промоделированы процессы кристаллизации и формирования фазового состава в базовых системах Al-Mg-Si и Al-Mg-Si-Ti, построены соответствующие изотермические и политермические сечения, определены температурные и концентрационные условия формирования целевых армирующих фаз. Изложены этапы отработки технологического процесса получения композиционных материалов систем Al-Mg₂Si, Al-Mg₂Si-SiC(B₄C), Al-Mg₂Si-Al₃Ti, изучены структура и свойства полученных материалов. Обоснована необходимость модифицирующей обработки литых композиционных материалов с эндогенными фазами кристаллизационного происхождения. Установлено влияние термоскоростной и электромагнитной импульсной обработки расплавов на структурно-морфологические параметры, распределение элементов в структурных составляющих и на основные свойства литых композиционных материалов, содержащих эндогенные частицы Mg₂Si (св-во о рег. БД №2022623568). На основе полученных результатов даны рекомендации по модифицирующей обработке алюмоматричных композитов с применением внешних физических воздействий при плавке и кристаллизации. Важным для теории и практики результатом является экспериментально установленный и подтвержденный факт зарождения фазы Mg₂Si на поверхности частиц SiC, а также увеличения доли дендритов твердого раствора и уменьшения эвтектической составляющей при увеличении доли частиц экзогенной фазы в литом композите. Проведена оценка изменения литейных

свойств (жидкотекучесть, линейная и объемная усадка, горячеломкость) алюмоматричных композитов, содержащих эндогенные фазы кристаллизационного происхождения.

В **пятой главе** исследовано влияние технологических факторов на формирование и эволюцию дефектов литой структуры алюмоматричных композиционных материалов. Предложена классификация внутренних дефектов отливок из композиционных материалов. Дана характеристика различных видов дефектов и проведен анализ причин их образования с выявлением основных механизмов. Установлены рациональные технологические параметры плавки и литья алюмоматричных композитов, обеспечивающие повышенное качество слитков, и определены мероприятия по снижению пористости и степени кластеризации армирующих частиц в литой структуре. Приведены сведения о влиянии рафинирующей обработки матричного расплава на содержание литейных дефектов в слитках алюмоматричных композиционных материалов. Разработаны и апробированы методика автоматизированного проведения количественной оценки степени равномерности распределения армирующих частиц в литой структуре композиционных материалов (св-во о рег. ПО ЭВМ №2021619286) и методика неразрушающего рентгеновского томографического контроля алюмоматричных композитов, обеспечивающая идентификацию дефектов структуры и выявление различных структурных составляющих.

В **шестой главе** на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований сформулированы и обоснованы общие принципы рециклинга литых композиционных материалов. Рассмотрены различные виды отходов производства литых композиционных материалов (брак отливок и слитков, литники, шлаки, стружка и др.) и обозначены наиболее рациональные способы их переработки. Представлена классификация способов рециклинга отходов производства и потребления литых металломатричных композитов. Установлено влияние многократных переплавов на структуру (долевое содержание, дисперсность, распределение армирующей фазы, состояние межфазных границ и др.), фазовый состав и свойства литых моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов. Выявлены особенности межфазного взаимодействия различных армирующих компонентов с матричным алюминиевым расплавом и изучен состав продуктов реакций. Проведена оценка изменения физико-механических и трибологических свойств литых композиционных материалов в зависимости от температуры перегрева расплава и времени выдержки при переплавах. Сформулированы технологические рекомендации по обеспечению надлежащего качества вторичных композиционных материалов при их рециклинге методом переплава.

В **седьмой главе** представлены конкретные примеры практической реализации полученных научных результатов в виде промышленной апробации и внедрения технологий и изготавливаемой литейной продукции в условиях ООО НТЦ «Композит» (г. Владимир), ООО «Литейный завод ЛИТМАШ» (г. Шуя), Ивановского силикатного завода (г. Иваново), ООО ВФ «Текс-Интер» (г. Ковров), ООО «УМСР-2» (г. Владимир) и других предприятий. Приведены сведения об отливках-представителях, выпущенных в производственных условиях для проведения опытно-промышленных испытаний комплексно-армированных композиционных материалов. Изложены особенности промышленной реализации разработанных технологий плавки, модифицирующей обработки и разлива алюмоматричных композитов. Даны конкретные рекомендации по масштабированию и внедрению предла-

гаемых технических и технологических решений по термоскоростной и электромагнитной импульсной обработке композиционных расплавов. Показано, что в зависимости от номенклатуры осваиваемой продукции ожидаемый экономический эффект достигает 391,4 млн. рублей. Рассмотрены прямые и косвенные экологические эффекты от внедрения литых композиционных материалов.

В **заключении** сформулированы выводы по работе, предложены основные направления дальнейших исследований в развитие тематики диссертации.

В **приложениях** приведены акты о внедрении и испытаниях, а также данные к оценке экономической эффективности внедрения разработанных решений.

В целом работа изложена технически грамотным языком. Каждая глава содержит важные результаты научных исследований автора и сопровождается развернутыми выводами. Общее оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам.

Значимость для науки **результатов диссертационного исследования**

Работа содержит ряд научных результатов, отличающихся научной новизной, наиболее значимыми из которых для развития литейной отрасли являются следующие:

- разработана концепция синтеза литых комплексно-армированных композиционных материалов для отливок ответственного назначения, основанная на многокритериальном выборе компонентов легирующего и армирующего комплексов;
- выполнена термодинамическая оценка влияния легирующих элементов на процессы структуро- и фазообразования при получении литых алюмоматричных композиционных материалов с экзогенным армированием в условиях металлургических технологий;
- установлены количественные взаимосвязи составов легирующего и армирующего комплексов и условий ввода или формирования армирующих фаз в объеме матричных алюминиевых расплавов со структурой и свойствами литых композиционных материалов;
- выявлены закономерности изменения структурно-морфологических параметров эндогенных армирующих фаз реакционного и кристаллизационного происхождения при химических (модифицирование РЗМ) и физических воздействиях (термоскоростная и электромагнитная импульсная обработка) на расплавы литых моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов;
- впервые дано научное обоснование влияния многократных переплавов на структуру (долевое содержание, дисперсность, распределение армирующей фазы, состояние межфазных границ), механические и эксплуатационные свойства литых моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов;
- установлены механизмы и причины формирования дефектов литой структуры моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов.

Значимость для практики **результатов диссертационного исследования**

К наиболее значимым практическим результатам диссертационного исследования можно отнести следующие:

- разработаны и масштабированы до производственной реализации технологические процессы изготовления литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами, обеспечивающие получение отливок ответственного назначения с применением гравитационных методов литья;

- разработаны методики контроля качества литых композиционных материалов, основанные на автоматизированной количественной оценке равномерности распределения армирующих частиц и неразрушающей идентификации характерных видов дефектов литой структуры;

- разработаны технологические мероприятия по снижению пористости и степени кластеризации армирующих частиц в литой структуре композиционных материалов с экзотическим и комплексным армированием;

- разработаны технологические рекомендации по переработке отходов производства литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов, обеспечивающие требуемые параметры литой структуры при использовании стандартного технологического оборудования литейных цехов;

- по результатам оценки технико-экономических показателей внедрения разработанных решений показана возможность получения ожидаемого экономического эффекта от внедрения разработанных технологий в размере до 391,4 млн. рублей.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается промышленным освоением предложенных технологий плавки и литья комплексно-армированных композиционных материалов при выпуске отливок для экскаваторной техники, промышленного железнодорожного транспорта, текстильных машин. Приоритет разработанных технических и технологических решений подтвержден патентами и свидетельствами РФ, публикациями в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, докладами на международных и всероссийских научных мероприятиях, представлением результатов на крупных международных выставках, а также актами о внедрении и использовании результатов работы в производственных условиях.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Полученные в работе научные и практические результаты могут быть рекомендованы к использованию при производстве литых изделий для эксплуатации в узлах различного технологического оборудования (металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, компрессоры, насосы высокого давления и др.), автомобильной, дорожно-строительной технике и других областях в качестве альтернативы традиционным сплавам.

Разработанные методики контроля качества литых композиционных материалов с использованием методов компьютерной металлографии и томографии могут представлять интерес для использования в заводских лабораториях на предприятиях литейного производства при решении задач количественной идентификации дефектов отливок и слитков.

Результаты лабораторных и промышленных экспериментов по модифицирующей обработке расплавов металломатричных композиционных материалов с использованием технологий термоскоростной обработки и наложения наносекундных электромагнитных

импульсов целесообразно применять для комплексного модифицирующего воздействия на структурные составляющие промышленных алюминиевых сплавов (в частности, на основе системы Al-Mg-Si).

Разработанные технологические рекомендации по переработке отходов производства и по проведению повторных переплавов литых композиционных материалов имеют большое практическое значение для организации производства отливок из металломатричных композитов в условиях действующих литейных и машиностроительных предприятий без необходимости их дооснащения специальным оборудованием.

Замечания по диссертации

Диссертация в целом выполнена на высоком научно-методическом уровне. Вместе с тем, по работе имеются следующие замечания:

1. Автором дана развернутая характеристика металломатричных композитов как литейных материалов, однако не освещены особенности проектирования и расчета литниково-питающих систем для изготовления из них фасонных отливок. По-видимому, должны существовать какие-то отличия в сравнении с получением отливок из стандартных алюминиевых сплавов?
2. При анализе процессов формирования и эволюции дефектов литой структуры композиционных материалов не рассмотрена возможность процессов седиментации армирующих частиц при выдержке композиции в жидком состоянии. Как минимум, автор должен убедиться в её присутствии или отсутствии за актуальный период плавки в некотором заданном интервале температур.
3. Не ясно, чем обусловлено установление значения степени равномерности распределения армирующих частиц в литой структуре до 0,6 в качестве удовлетворительного при обосновании показателей качества отливок из композиционных материалов.
4. Отдельные результаты экспериментальных исследований изложены по тексту диссертационной работы в описательном формате, но не визуализированы, что затрудняет их восприятие (см. например, стр. 205-206, 225-227 и др.).
5. Не рассмотрена возможность применения способов рафинирующей обработки композиционных расплавов с использованием физических воздействий (ультразвуковая обработка, пропускание электрического тока и др.).
6. В седьмой главе диссертации, посвященной практическому использованию полученных результатов, следовало выделить в систематизированном виде составы комплексно-армированных композиционных материалов, рекомендованных для промышленного использования, и их основные свойства.

Представленные замечания носят дискуссионный либо рекомендательный характер и не снижают научную и практическую значимость полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Прусова Евгения Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором разработаны новые научно обоснован-

ные технологические решения по получению литых комплексно-армированных композиционных материалов как объектов и средств реализации литейных технологий, использование которых вносит значительный вклад в развитие страны. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.3 – Литейное производство. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и в необходимом объеме отражает ее основные результаты и выводы. Результаты работы достаточно полно освещены в научной печати, защищены патентами и свидетельствами Российской Федерации.

По актуальности, научному уровню, полученным результатам, их новизне и практической значимости, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует всем критериям, установленным п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции). Автор диссертации, Прусов Евгений Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – Литейное производство.

Диссертационная работа рассмотрена и обсуждена на заседании кафедры литейного производства и упрочняющих технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол №11 от «26» октября 2023 г. Присутствовали 15 человек из 18. Результаты голосования: за - 15, против – нет, воздержавшихся – нет.

Заведующий кафедрой литейного производства
и упрочняющих технологий ФГАОУ ВО «УрФУ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор технических наук (специальность
05.16.04 – Литейное производство),
доцент

Сулицин
Андрей Владимирович

Наименование организации в соответствии с уставом: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Адрес организации: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел.: +7 (343) 375-44-44
E-mail: rector@urfu.ru
Сайт: <https://urfu.ru/>