

ОТЗЫВ

официального оппонента

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 диссертации.

Развитие современного машиностроения и других высокотехнологичных секторов промышленности неразрывно связано с повышением требований к механическим и эксплуатационным свойствам применяемых материалов. Литейные алюминиевые сплавы получили в настоящее время широкое распространение для изготовления фасонных отливок в различных отраслях, благодаря хорошим показателям удельной прочности, коррозионной стойкости и технологичности. Однако большинство промышленных алюминиевых сплавов характеризуются сравнительно низкой жесткостью, износо- и задиростойкостью, твердостью, прочностью на сжатие, а также высоким коэффициентом термического расширения, что ограничивает их применение для изготовления отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по совокупности обозначенных характеристик.

Использование литых композиционных материалов, создаваемых путем ввода в металлическую основу дисперсных частиц различных тугоплавких соединений, позволяет существенно повысить свойства и характеристики изделий в широких температурно-силовых интервалах эксплуатации. Вместе с тем, до настоящего времени методологические принципы выбора компонентов алюмоматричных композитов и технологические процессы их плавки и литья остаются недостаточно разработанными, что сдерживает широкое внедрение этих перспективных материалов в промышленности. Отсутствие научно обоснованных практических рекомендаций по проектированию составов литых композиционных материалов с учетом физико-химических и технологических факторов приводит к многочисленным трудностям при их получении металлургическими методами и, как следствие, к нестабильному качеству получаемых отливок. Перечисленные проблемные вопросы особенно остро проявляются при получении алюмоматричных композитов гибридного состава, содержащих два и более разнородных армирующих компонентов.

Дальнейшее развитие работ в этом направлении связано с созданием нового поколения литых комплексно-армированных композиционных материалов путем комбинирования экзогенного и эндогенного армирования алюминиевых сплавов частицами различной физико-химической природы.

Такой подход является перспективным с позиций повышения эффективности армирующего действия компонентов за счет их совместного влияния, что позволяет снизить предельные концентрации армирующих частиц при обеспечении заданного уровня механических и эксплуатационных свойств. Развитие методологии синтеза комплексно-армированных композиционных материалов открывает большие потенциальные возможности для разработки промышленно значимых металлургических технологий, пригодных для массового производства литых изделий из алюмоматричных композитов, что обуславливает высокую актуальность темы работы Прусова Е.С.

Общая характеристика работы. Диссертационная работа представлена на 365 страницах машинописного текста, включая приложения, и содержит 96 рисунков, 23 таблицы и список литературы из 440 наименований.

Основные результаты диссертационной работы представлены в 90 публикациях, в том числе одной монографии; 23 публикациях в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ; 21 публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus; 9 патентах на изобретения, полезные модели, свидетельствах на базы данных и программы для ЭВМ.

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 соответствие паспорту научной специальности.

В первой главе приведен развернутый аналитический обзор литературных и патентных источников, отражающий современные представления о литых композиционных материалах и технологических процессах их получения. Детально рассмотрены общемировые тенденции разработки литых композиционных материалов с акцентом на основополагающие работы ведущих отечественных и зарубежных специалистов. Автором разработана оригинальная классификация металлургических методов получения композиционных материалов по принципу реализации способа армирования, систематизированы и критически проанализированы различные технологические приемы экзогенного и эндогенного армирования. Несомненным плюсом обзора является глубокая проработка и обобщение передового опыта практического использования литых изделий из алюмоматричных композитов в различных отраслях промышленности. Сформирован и обоснован терминологический аппарат в новом направлении теории и технологии композиционных материалов, связанном с получением комплексно-армированных металломатричных композитов как подкласса гибридных композитов.

На основе проведенного всестороннего анализа сделаны выводы о

недостаточной изученности вопросов методологии выбора армирующих компонентов и создания комплексно-армированных алюмоматричных композитов, а также вопросов рециклинга и проблемам качества отливок ответственного назначения из них. Автором убедительно показана целесообразность комплексного армирования алюминиевых сплавов экзогенными порошкообразными частицами и эндогенными армирующими фазами, полученными при реакционном либо кристаллизационном их формировании. При этом в отдельную категорию для разработки и изучения выделены гибридные литейные композиты, содержащие одновременно армирующие фазы реакционного и кристаллизационного происхождения, что является новым направлением для отечественной и мировой науки.

Во второй главе изложены основные положения разработанной автором методологии проектирования литых композиционных материалов. Для решения этой задачи в диссертации предложен оригинальный подход к постадийному проектированию составов металломатричных композитов. Разработаны универсальные взаимодополняющие критерии выбора армирующих компонентов для литых композиционных материалов (термодинамическая стабильность, термомеханическая совместимость, удельная жесткость, экономическая целесообразность и др.), по каждому из которых проведен последовательный отбор перспективных тугоплавких соединений с выходом на системы комплексного армирования Al-Al₃Ti-(SiC, B₄C), Al-Mg₂Si-(SiC, B₄C), Al-Mg₂Si-Al₃Ti. Предложенные соискателем методологические принципы позволяют обоснованно подойти к выбору приоритетных направлений экспериментального поиска комбинаций матричных сплавов и армирующих компонентов литых металломатричных композитов под различные условия эксплуатации изделий. Представляется, что возможности разработанной системы проектирования композиционных материалов являются достаточно широкими и могут быть масштабированы на другие матричные сплавы (цинковые, медные, оловянные и др.).

В третьей главе представлены результаты термодинамического моделирования и экспериментальных исследований литых комплексно-армированных композиционных материалов системы Al-Al₃Ti-(SiC, B₄C) с эндогенными фазами реакционного происхождения (в частности, Al₃Ti). Термодинамическое описание фазовых равновесий в базовых системах Al-Ti-Si-C и Al-Ti-B-C, выполненное с использованием программного пакета Thermo-Calc и собственного программного обеспечения автора, позволило установить характер взаимодействия компонентов литых металломатричных композитов и спрогнозировать фазовые превращения в присутствии различных легирующих элементов. С учетом сделанных прогнозных оценок автором определены и отработаны технологические приемы и режимы получения литых композиционных материалов с использованием смесей порошковых прекурсоров, обеспечивающие повышенную степень усвоения матричными расплавами экзогенных армирующих компонентов SiC или B₄C

(до 90-93%). Большой интерес представляет выведенная диссертантом аналитическая зависимость, описывающая влияние различных факторов на жидкотекучесть металломатричных композитов. Получены новые экспериментальные данные о формировании структуры и фазового состава комплексно-армированных композиционных материалов с эндогенными фазами реакционного происхождения.

В четвертой главе рассмотрены особенности получения, структура и свойства литых комплексно-армированных композиционных материалов с эндогенными фазами кристаллизационного происхождения (системы Al-Mg₂Si-SiC, Al-Mg₂Si-B₄C). Для прогнозирования фазового состава композиционных материалов, содержащих одновременно армирующие фазы кристаллизационного и реакционного происхождения, автором построены изотермические и политермические сечения диаграммы системы Al-Mg-Si-Ti, установлены зависимости массовой доли твердых фаз от температуры при неравновесной кристаллизации. Приведены сведения об отработке технологического процесса получения литых композиционных материалов с первичной фазой Mg₂Si и экзогенными частицами SiC или B₄C. Особое внимание уделено разработке способов управления структурно-морфологическими параметрами эндогенных армирующих фаз кристаллизационного происхождения с применением физических (термоскоростная и электромагнитная импульсная обработка расплава) и химических (модифицирование РЗМ) воздействий. Эффективность предложенных технологических решений подтверждена статистическими оценками количественных параметров микроструктуры композитов, а также представленными данными по механическим, трибологическим и литейным свойствам.

В пятой главе представлен авторский вариант классификации литейных дефектов в отливках и слитках из металломатричных композиционных материалов, дана характеристика различных видов дефектов, описаны причины и механизмы их формирования. Разработаны оригинальные методики контроля качества отливок из композиционных материалов, основанные на количественной оценке степени равномерности распределения армирующих частиц по репрезентативным выборкам металлографических изображений и на объемной диагностике дефектов литой структуры с применением рентгеновской компьютерной томографии. Отработанные параметры томографического сканирования позволяют осуществлять неразрушающую идентификацию структурных составляющих металломатричных композитов без специальной подготовки образцов. Приведены результаты исследований влияния технологических факторов на формирование и эволюцию литейных дефектов при получении металломатричных композитов, содержащих экзогенные армирующие частицы. Предложен комплекс технологических мероприятий по повышению качества отливок и слитков из композиционных материалов на основе

алюминиевых сплавов, включающих конкретные параметры механического замешивания порошкообразных частиц в матричные расплавы.

В шестой главе представлены результаты исследований по установлению влияния переработки методом переплава на изменение структуры и свойств литых композиционных материалов с экзогенным и комплексным армированием. Автором сформулированы общие принципы рециклинга металломатричных композитов в зависимости от их компонентного состава и вида отходов производства (бракованные отливки, фрагменты литниковых систем, шлаки, стружечные отходы и др.). Приведены количественные характеристики процессов перераспределения экзогенных армирующих фаз при многократных переплавах литых композиционных материалов, изучено влияние переплавов на сохранение и химическую стабильность частиц SiC и В₄C. Определены температурно-временные и концентрационные условия, при которых интенсифицируются процессы деградации армирующих частиц, и даны рекомендации по технологическим параметрам жидкофазной переработки металломатричных композитов, обеспечивающим повышенное качество рециклируемых материалов. Для решения задач использован комплекс взаимодополняющих современных методик исследования, в том числе рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, дифференциально-сканирующая калориметрия, механические и трибологические испытания и др. При разработке технологических рекомендаций по переработке отходов производства отливок из композиционных материалов использованы методы математического планирования эксперимента с обработкой результатов в специализированном программном пакете Minitab, что позволило выявить преобладающие факторы изменения механических и эксплуатационных свойств композитов в процессах рециклинга.

В седьмой главе приведены сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов, что определяет логическую завершенность диссертационной работы. В частности, изложены результаты промышленного освоения и внедрения в производство разработанных технологий плавки и литья комплексно-армированных композиционных материалов. Сформирована номенклатура отливок-представителей, которые целесообразно изготавливать из литых металломатричных композитов взамен традиционных сплавов, и приведены данные об их опытно-промышленных испытаниях на ряде отечественных предприятий. С применением метода финансового моделирования определены технико-экономические показатели внедрения литых комплексно-армированных композиционных материалов в промышленности. Рассмотрены экологические аспекты внедрения разработанных технологических процессов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе, предложены направления дальнейшего развития темы исследования.

В приложениях представлены акты о внедрении результатов работы и опытно-промышленных испытаниях, а также исходные данные к оценке

экономической эффективности внедрения литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов.

Научная новизна работы. В диссертации разработана методология многокритериального выбора компонентов легирующего и армирующего комплекса при синтезе литых алюмоматричных композиционных материалов. Установлены физико-химические закономерности и механизмы взаимодействия компонентов комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов различных систем ($\text{Al-Al}_3\text{Ti-SiC}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-SiC}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-B}_4\text{C}$) в процессах плавки и литья. Установлены количественные взаимосвязи составов легирующего и армирующего комплексов и условий ввода или формирования армирующих фаз в объеме матричных расплавов со структурой и свойствами литых композиционных материалов. Разработаны научные принципы управления структурно-морфологическими параметрами эндогенных армирующих фаз реакционного и кристаллизационного происхождения путем химических (модифицирование РЗМ) и физических (термоскоростная и электромагнитная импульсная обработка) воздействий на расплавы литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов. Впервые установлены закономерности взаимодействия экзогенных и эндогенных армирующих фаз с расплавом в процессах рециклинга литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов различных систем (Al-SiC , $\text{Al-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-SiC}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-SiC}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-B}_4\text{C}$), составившие научное обоснование влияния многократных переплавов на структуру (долевое содержание, дисперсность, распределение армирующей фазы, состояние межфазных границ), механические и эксплуатационные свойства. Выявлены механизмы и причины формирования дефектов литой структуры моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов.

Практическая значимость. Разработаны технологические процессы изготовления литых комплексно-армированных композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов различных систем ($\text{Al-Al}_3\text{Ti-SiC}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-SiC}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-B}_4\text{C}$) с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами, обеспечивающие получение отливок заданного качества в условиях 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 приемы жидкофазной переработки отходов производства

литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов различных систем (Al-SiC, Al-B₄C, Al-Al₃Ti, Al-Mg₂Si, Al-Al₃Ti-SiC, Al-Al₃Ti-B₄C, Al-Mg₂Si-Al₃Ti, Al-Mg₂Si-SiC, Al-Mg₂Si-B₄C), 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 (на примере отливок различной номенклатуры для текстильного машиностроения, горнодобывающей техники и железнодорожного транспорта). Показано, что внедрение разработанных технологических процессов не приводит к ухудшению условий труда по сравнению с таковыми в типовых цехах фасонного алюминиевого литья в разовые и постоянные формы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, и их достоверность. Обоснованность и достоверность полученных автором научных и практических результатов обеспечивается соответствием результатов работы результатам, представленным в независимых источниках по данной тематике, использованием современных средств и взаимодополняющих методик исследований, сертифицированного аналитического и испытательного оборудования, репрезентативной выборкой экспериментальных данных, их обработкой с применением общепринятых методов математической статистики и специализированного программного обеспечения. Представленные в диссертации научные результаты прошли широкую апробацию на различных российских и международных конференциях и семинарах, опубликованы в ведущих профильных отечественных и зарубежных изданиях, внедрены на действующих предприятиях и обеспечивают достижение значительного экономического эффекта. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в заключении диссертации, согласуются с целью и задачами исследований, являются обоснованными и представляют собой логическое обобщение проведенных автором исследований и разработок.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты диссертационного исследования Прусова Е.С. рекомендуются для использования в качестве методической основы при разработке промышленных технологий плавки и литья металломатричных композиционных материалов в условиях металлургических, литейных и машиностроительных предприятий. Полученные данные по механическим и эксплуатационным свойствам в

совокупности с накопленным опытом практического применения комплексно-армированных металломатричных композитов могут быть использованы для принятия решений при выборе материала для изготовления литых изделий ответственного назначения в сферах текстильного машиностроения, горнодобывающей техники, железнодорожного транспорта и в других отраслях промышленности. Новые методики, разработанные автором при проведении исследований, могут быть рекомендованы для внедрения в центральных заводских лабораториях предприятий при проведении количественного металлографического анализа образцов алюминиевых сплавов и композитов, а также рентгеновских томографических исследований фасонных отливок.

Соответствие автореферата диссертации. Диссертационная работа и автореферат находятся в полном соответствии по своему содержанию, оформлены в соответствии с требованиями ВАК РФ. В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показаны вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований. Материалы диссертации, включая основные защищаемые положения, нашли достаточно полное отражение в работах, опубликованных по теме проведенного исследования.

Замечания и вопросы по работе.

1. При проведении термодинамической оценки влияния легирующих элементов на процессы фазообразования при получении комплексно-армированных композиционных материалов (раздел 3.1.3 диссертации) выбраны основные элементы Si, Mg, Cu, а также титан как прекурсор для образования алюминидных армирующих фаз. Не ясно, почему не рассмотрены другие распространенные элементы, характерные для промышленных алюминиевых сплавов. В первую очередь, это относится к железу, который практически неизбежно присутствует в данных сплавах в качестве примеси.
2. Недостаточно экспериментальных данных по механическим свойствам на растяжение (нет ни одной таблицы!), которые являются ключевыми для всех материалов конструкционного назначения. С другой стороны, в табл.3 приведены такие данные для композитов зарубежных производителей. Явно напрашивается сравнение.
3. Поскольку диссертация нацелена на получение литых деталей, то следовало бы дать сравнительный анализ литейных свойств предлагаемых композитов и соответствующих матричных сплавов.
4. В п. 4.1 слишком много места занимает описание фазового состава и структуры сплавов системы Al–Si–Mg, которая хорошо изучена.
5. В п. 4.4 рассмотрено формирование композитов с участием фазы Al_3Ti , однако в выводах по главе 4 полученные результаты не нашли

- отражения.
6. В п.4.5 приводятся результаты положительного влияния добавок церия и лантана на жидкотекучесть и горячеломкость композитов, содержащих фазу Mg_2Si . Однако влияние этих добавок на фазовый состав не рассматривается. Учитывая, что оптимальные концентрации Ce и La (по 0,3 мас.%) превышают их растворимость в алюминиевом твердом растворе, следует ожидать образования избыточных фаз (в частности, соединений, содержащих Al, Si и PЗМ).
 7. Термодинамическое описание фазовых равновесий в базовых системах Al-Ti-Si-C и Al-Ti-B-C (раздел 3.1.1) целесообразно было бы дополнить анализом кривых Шейля-Гулливера для неравновесной кристаллизации.
 8. Многие значения, полученные экспериментально, приведены с явно избыточной точностью, намного превышающей ошибку измерения. Например, на рис.65 (микротвердость - 0,01 МПа), в табл.18,19 (средний размер частиц - 0,0001 мкм), в тексте на с.289 (плотность - 0,00001 г/см³).
 9. Значения твердости приводятся как по Виккерсу (МПа), так и по Роквеллу (HRB), что затрудняет сравнение. Следовало бы последние переводить в МПа.
 10. В табл.14 указано, что средний размер частиц Al_3Ti составляет 30 мкм, а максимальный - 10 мкм. Вероятно, что значения перепутаны.
 11. В тексте на с.93 написано «В качестве объекта термодинамических расчетов для примера выбрана тройная система Al-Si-X (где X = Si, Cu, Mg, Zn, Mn, Ni, Ti, Fe).....», т.е. кремний указан в двух местах (Al-Si-Si?).

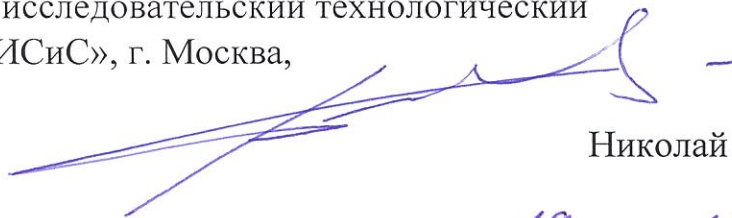
Заключение по работе

В целом, указанные замечания не снижают общую положительную оценку. Диссертационная работа Прусова Е.С. «**Развитие научных основ создания литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов для отливок ответственного назначения**» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладающей научной новизной и практической значимостью, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по получению литых комплексно-армированных композиционных материалов как объектов и средств реализации литейных технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Работа выполнена на высоком научном уровне, соответствует паспорту специальности 2.6.3 «Литейное производство» и требованиям пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции), а ее автор, **Прусов Евгений Сергеевич**, заслуживает

присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – «Литейное производство».

Официальный оппонент:

доктор технических наук (05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»), профессор, главный научный сотрудник кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва,



Белов
Николай Александрович

« 19 » 10 2023 г.

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4., стр. 1, НИТУ «МИСиС»
Тел. +7 (910) 476-58-57, E-mail: nikolay-belov@yandex.ru

Подпись проф. Белова Николая Александровича удостоверяю:

Проректор по безопасности
и общим вопросам



И.М. Исаев