

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Прусова Евгения Сергеевича

«Развитие научных основ создания литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов для отливок ответственного назначения», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3. Литейное производство

Актуальность диссертационного исследования.

В настоящее время литейная промышленность сталкивается с постоянно растущими требованиями к качеству и свойствам отливок со стороны машиностроения, авиастроения, автомобилестроения и других отраслей. Разработка новых алюмоматричных композиционных материалов с повышенными функциональными характеристиками и технологий получения из них высококачественных отливок представляет собой перспективное направление работ, ориентированных на повышение надёжности и долговечности эксплуатации деталей ответственного назначения. Поэтому тема диссертационной работы Прусова Е.С. является актуальной для современного литейного производства и имеет как научный, так и практический интерес.

Общая характеристика работы.

Диссертация изложена на 365 страницах машинописного текста, включая 96 рисунков, 23 таблицы, и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 440 источников и двух приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, связь с научными проектами, личный вклад соискателя и сведения о соответствии диссертации заявленной научной специальности.

В первой главе выполнен информационно-аналитический обзор состояния вопроса. Дана общая характеристика литых композиционных материалов как альтернативы традиционным сплавам на основе черных и цветных металлов. Рассмотрен научный вклад в развитие области исследования, сделанный

зарубежными и отечественными коллективами с 60-х гг. XX в. и до настоящего времени. Приведены сведения об освоении технологий плавки и литья алюмоматричных композиционных материалов зарубежными предприятиями и опыт применения изделий из них в различных отраслях промышленности. Обозначены основные проблемы, ограничивающие внедрение литых композиционных материалов в Российской Федерации. Особое внимание уделено анализу влияния армирования частицами на физико-механические и эксплуатационные свойства литых композиционных материалов с позиций современных теоретических представлений.

Предложена авторская классификация жидкофазных методов получения литых композиционных материалов по принципу реализации способа армирования с развернутой характеристикой каждого метода. Выделены основные факторы, которые необходимо учитывать при выборе рационального метода получения алюмоматричных композитов. Обозначены и обоснованы предпосылки для перехода к технологиям комплексного армирования алюминиевых сплавов. Показаны особенности и преимущества использования двух или более различных типов армирующих компонентов, что позволяет получать литые композиционные материалы гибридного состава. Проведенный анализ литературы позволил выделить перспективное направление разработки нового класса комплексно-армированных композиционных материалов для изготовления отливок ответственного назначения.

Вторая глава посвящена разработке методологии проектирования литых композиционных материалов. Предложена система проектирования литых композиционных материалов на основе критериального выбора матрицы и компонентов, легирующего и армирующего комплексов. Для выбора основы матричного сплава и легирующих элементов использованы элементы системы синтеза сплавов, предложенной Б.Б. Гуляевым. Проведена расчетная оценка изменения химической стабильности армирующих компонентов при добавлении различных легирующих элементов в матричные алюминиевые расплавы по их влиянию на термодинамическую активность. Критериальный выбор компонентов литых композиционных материалов предложено осуществлять с использованием диаграмм распределения, построенных в работе для различных классов тугоплавких соединений (карбиды, бориды, оксиды, нитриды, си-

лициды, алюминиды). Для определения перспективных армирующих компонентов разработаны и обоснованы критерии термодинамической стабильности, термомеханической совместимости, удельной жесткости, технологической совместимости, кристаллографического соответствия, экономической целесообразности. Даны рекомендации по использованию различных соединений в качестве армирующих фаз при получении литых комплексно-армированных композиционных материалов с разделением на эндогенные и экзогенные компоненты.

В третьей главе приведены результаты исследований литых комплексно-армированных композиционных материалов системы Al-Al₃Ti-X (где X = SiC, B₄C) с эндогенными фазами реакционного происхождения. Выполнена термодинамическая оценка процессов межфазного взаимодействия при получении алюмоматричных композитов на основе исследуемых систем с использованием методологии CALPHAD (в частности, построение фазовых диаграмм и моделирование кристаллизации в Thermo-Calc) и методов вычислительной термодинамики, реализованных в собственной программной разработке автора. Полученные расчетные данные нашли отражение в созданном комплексе баз данных, содержащих сведения о термодинамических характеристиках взаимодействия различных армирующих фаз с алюминиевым расплавом и защищенных свидетельствами Роспатента. Показано влияние легирующих элементов на взаимодействие компонентов и формирование фазового состава при получении литых композиционных материалов с экзогенными частицами. На основе результатов экспериментальных исследований по отработке различных вариантов получения комплексно-армированных композиционных материалов с эндогенными фазами реакционного происхождения разработаны и обоснованы технологические схемы их выплавки. Предложена аналитическая форма уравнения, описывающего влияние различных факторов на жидкотекучесть металломатричных композиционных материалов. Показано, что наиболее значительным фактором является радиус канала, зависимость жидкотекучести от размера которого при литье композитов носит квадратичный характер. Изучены особенности формирования структуры и свойств литых комплексно-армированных композиционных материалов.

Четвёртая глава посвящена разработке новых составов и технологий

плавки и модифицирующей обработки литых комплексно-армированных композиционных материалов с эндогенными фазами кристаллизационного происхождения (системы Al-Mg₂Si-Al₃Ti, Al-Mg₂Si-SiC, Al-Mg₂Si-B₄C). Приведены расчетные данные о термодинамических характеристиках процессов кристаллизации и структурообразования в системах Al-Mg-Si и Al-Mg-Si-Ti, по результатам которых определены температурно-концентрационные условия формирования эндогенных армирующих фаз. Разработаны технологические режимы получения литых композиционных материалов с гибридным (Mg₂Si, Al₃Ti) и комплексным (Mg₂Si, SiC (B₄C)) армированием. Изучено влияние физических (термоскоростная обработка, наложение электромагнитных импульсов) и химических (ввод РЗМ) модифицирующих воздействий на изменение структурно-морфологических параметров эндогенных фаз кристаллизационного происхождения, что позволило определить рациональные способы обработки композиционных расплавов. Приведены сведения о влиянии модифицирования на жидкотекучесть, усадку и горячеломкость алюмоматричных композитов.

Пятая глава включает результаты исследований дефектов литой структуры алюмоматричных композиционных материалов. Предложена классификация литейных дефектов, учитывающая несплошности структуры, распределение армирующих фаз и состояние межфазных границ раздела, и проведен анализ причин формирования различных внутренних дефектов на основе результатов экспериментов по изучению влияния технологических факторов на их образование. Разработаны методики контроля качества литых композиционных материалов с использованием автоматизированной количественной оценки степени равномерности распределения армирующих частиц и неразрушающей рентгено-томографической диагностики. Отработаны режимы сканирования, обеспечивающие качественную томографическую идентификацию и количественное определение структурно-морфологических характеристик армирующих фаз по диапазонам рентгеноконтрастности. Обозначены преимущества предложенных решений для промежуточного контроля объемной структуры материалов на различных этапах технологического цикла получения алюмоматричных композитов, включая анализ макростроения брикетированных порошковых прекурсоров. Разработаны технологические мероприятия,

обеспечивающие минимальное содержание литейных дефектов при получении алюмоматричных композиционных материалов.

В шестой главе приведены сведения о формировании структуры и свойств литых композиционных материалов различных систем в процессах рециклинга методом переплава. Рассмотрены общие принципы рециклинга алюмоматричных композитов, дана характеристика различных видов отходов их производства и определены наиболее рациональные способы переработки. Предложена классификация способов переработки отходов производства и потребления литых композиционных материалов, учитывающая вид и состояние отходов. Выявлены технологические факторы, влияющие на степень изменения свойств алюмоматричных композитов при многократных переплавах. Детально изучено влияние переплавов на количественные структурно-морфологические характеристики композиционных материалов с экзогенным и комплексным армированием (долевое содержание, дисперсность, распределение армирующей фазы, состояние межфазных границ и др.). Технологические рекомендации по переработке отходов производства отливок из композиционных материалов разработаны с использованием методов математического планирования эксперимента.

Седьмая глава содержит результаты промышленной апробации и внедрения литых комплексно-армированных композиционных материалов. Приведены сведения об опытно-промышленных испытаниях литых изделий из разработанных алюмоматричных композитов в узлах экскаваторной техники, технологического железнодорожного транспорта, текстильных машин. Изложены особенности реализации технологических процессов плавки и модифицирующей обработки комплексно-армированных алюмоматричных композитов в производственных условиях. Проведен экономический анализ ожидаемой эффективности внедрения литых композиционных материалов для изготовления отливок ответственного назначения и дана оценка экологических эффектов от промышленной реализации разработанных технологий.

В заключении автором сформулированы основные выводы по диссертационной работе, а также определены дальнейшие перспективы развития темы исследования.

Научная новизна работы. Наиболее значимыми научными результатами

работы, обладающими новизной, считаю следующие:

- разработана и научно обоснована методика синтеза литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов, основанная на последовательном отборе компонентов по критериям термодинамической стабильности, термомеханической совместимости, удельной жесткости, технологической совместимости, кристаллографического соответствия, экономической целесообразности с использованием компьютерных баз данных и диаграмм распределения;

- рассчитаны термодинамические параметры влияния легирующих и армирующих компонентов на процессы структуро- и фазообразования при получении литых алюмоматричных композиционных материалов в условиях металлургических технологий, позволившие установить рациональные температурно-концентрационные условия выплавки композитов на основе исследуемых систем;

- выявлено влияние химических и физических модифицирующих воздействий на расплавы литых моноармированных и комплексно-армированных композиционных материалов на структурно-морфологические параметры эндогенных армирующих фаз реакционного и кристаллизационного происхождения, при этом установлено, что при электромагнитной импульсной обработке композиционных расплавов с эндогенными фазами кристаллизационного происхождения количество первичных армирующих частиц увеличивается более чем на порядок при одновременном уменьшении их средних размеров с $147,69 \pm 48,27$ до $44,12 \pm 23,98$ мкм;

- установлено влияние многократных переплавов на структуру (долевое содержание, дисперсность, распределение армирующей фазы, состояние межфазных границ и др.), механические (твердость, предел прочности) и эксплуатационные (износостойкость, коэффициент трения) свойства литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов (Al-SiC, Al-B₄C, Al-Al₃Ti, Al-Mg₂Si, Al-Al₃Ti-SiC, Al-Al₃Ti-B₄C, Al-Mg₂Si-Al₃Ti, Al-Mg₂Si-SiC, Al-Mg₂Si-B₄C), при этом показано, что продолжительность выдержки расплава до разливки является преобладающим фактором изменения свойств при переплаве.

Практическая значимость диссертационной работы доказана тем, что:

- разработаны технологические процессы изготовления литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов различных систем ($\text{Al-Al}_3\text{Ti-SiC}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-SiC}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-B}_4\text{C}$) с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами, обеспечивающие получение отливок заданного качества в условиях гравитационных методов литья (пат. РФ №№2492261, 198414), при этом для ввода экзогенных частиц (SiC , B_4C) рекомендовано осуществлять механическое замешивание при частоте вращения импеллера 300 об/мин, температуре расплава 850 °С, скорости подачи частиц в расплав от 0,04 до 0,06 г/с;

- разработаны методики контроля качества литых композиционных материалов, основанные на автоматизированной количественной оценке равномерности распределения армирующих частиц (св-во о гос. регистрации ПО ЭВМ №2021619286) и неразрушающей идентификации характерных видов дефектов литой структуры;

- разработаны технологические схемы модифицирующей обработки композиционных расплавов с эндогенными армирующими фазами реакционного и кристаллизационного происхождения путем химических (ввод РЗМ) и физических (термоскоростная и электромагнитная импульсная обработка) воздействий;

- разработаны технологические приемы переработки отходов производства литых моноармированных и комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов различных систем (Al-SiC , $\text{Al-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-SiC}$, $\text{Al-Al}_3\text{Ti-B}_4\text{C}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-Al}_3\text{Ti}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-SiC}$, $\text{Al-Mg}_2\text{Si-B}_4\text{C}$), 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. Научные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными, логично следуют из совокупности полученных в работе результатов, соответствуют поставленной цели и задачам. Обоснованность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации Прусова Е.С., подтверждается критическим анализом результатов исследований отечественных и зарубежных авторов по рассматриваемой проблеме, системным подходом к решению задач работы, большим объемом согласованных данных теоретических и экспериментальных исследований, полученных с применением современных методов и инструментальных средств, анализом эмпирических данных с использованием специализированного программного обеспечения.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием теоретических положений термодинамики и металлургических процессов, современных сертифицированных методик и оборудования при проведении экспериментальных исследований, корректным использованием методов статистической обработки экспериментальных данных и подтверждается положительными результатами при опытно-промышленной апробации и внедрении разработок в условиях действующих производственных предприятий.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. Оформление диссертационной работы отвечает установленным требованиям. Диссертация написана грамотным, доступным техническим языком с разъяснением принятого терминологического аппарата в необходимых позициях.

Публикации и апробация результатов работы. По теме работы выпущена монография, 23 публикации в изданиях из Перечня ВАК РФ, 21 публикация в изданиях Scopus и Web of Science, получено 2 патента на изобретения и полезные модели, 7 свидетельств на базы данных и программы для ЭВМ. В приложениях к диссертации представлены акты о внедрении и испытаниях, а также данные для расчета экономической эффективности внедрения разработок. Результаты работы прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных мероприятиях.

Замечания

1) Патенты и свидетельства, указанные в п. 4 научной новизны и в п. 1 теоретической значимости работы, обычно приводят в разделе «Практическая значимость работы».

2) Автор пишет (Стр. 215) «Анализ СЭМ-изображений (рисунок 68) свидетельствует о радикальных морфологических изменениях псевдобинарной эвтектики при кристаллизации расплавов под действием НЭМИ.», далее он констатирует «Облучение НЭМИ приводит к увеличению наблюдаемого количества первичных частиц Mg_2Si в поле шлифа более чем на порядок», но почему и какие происходят изменения в матричном сплаве и модифицирующей добавке, за счет чего увеличиваются количество первичных частиц Mg_2Si .

3) Автор часто использует прилагательно сильный, сильного, причем в разных значениях, ведь это совершенно разные процессы, где-то это большое количество, где-то мощность, где-то стабильность и т.д. (модифицирующего воздействия (стр. 301, 218, 301), неравновесных условий (стр. 185), , вспениванию (стр. 235) сильной кластеризации (стр. 244), газонасыщенности расплава (стр. 265) фрагментации (стр. 293), реагирует с алюминиевым расплавом (стр. 293), неравновесных условий (стр. 185), что значит (сильно заэвтектических композитов (стр. 226)), а как понять не сильно заэвтектических, при этом нигде он не пишет, почему сильно и как он определил величину силы.

4) Не даны пояснения, с чем связано более лучшее усвоение карбида бора по сравнению с карбидом кремния при вводе экзогенных карбидных частиц в алюминиевые расплавы при создании комплексно – армированных композиционных материалов.

5) Поскольку трех точек недостаточно для выявления зависимостей, рисунки 46, 77 (а, б) более уместно было бы представить в виде гистограмм, а не графиков.

6) Научная новизна не конкретна (все пункты). Например, первый пункт «Разработаны научные **принципы многокритериального** выбора компонентов легирующего и армирующего комплекса при синтезе литых алюмоматричных композиционных материалов.», не понятно на чем основывается многокритериальность и в чем заключаются принципы.

Но, в тексте диссертации автор объясняет выбор армирующих компонентов по термомеханической совместимости с матричными материалами вводом ряда соотношений:

- коэффициентов термического расширения и теплопроводностью, это отношение используется автором в качестве показателя влияния армирующих частиц на температурно-размерную стабильность проектируемых металломатричных композитов и возможность тепловых деформаций материала в условиях термоциклических нагрузок изделий; использование этого отношения с позиции критерия термомеханической совместимости позволило автору рекомендовать в качестве предпочтительных армирующих фаз ряд соединений состоящих из: карбидов, нитридов и алюминидов этим коэффициентом автор обосновал рекомендации по использованию армирующих фаз в алюминиевую матрицу;

- для получения полей распределения потенциальных армирующих соединений по критерию удельной жесткости были построены диаграммы в координатах «модуль Юнга (E) – плотность (ρ)», при этом было обосновано, что удельная жесткость (отношение E/ρ) служит показателем, определяющим возможность снижения массы изделий и конструкций при одновременном повышении их упругих свойств; анализ соотношений E/ρ позволил автору определить предпочтение при выборе армирующих фаз отдавать следующим соединениям: карбидов, боридов, оксидов и силицидов.

Что, несомненно, научная новизна.

По другим пунктам научной новизны тоже в новизне нет конкретности, а в тексте диссертации новизна так же присутствует.

Заключение

Несмотря на отмеченные замечания, диссертация Е.С. Прусова является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Работа способствует дальнейшему научно-техническому прогрессу в области производства ответственного назначения за счет решения актуальной научной проблемы, связанной с разработкой составов и технологий получения литых композиционных материалов.

Считаю, что диссертационная работа, выполненная Прусовым Е.С., соответствует требованиям п. 9-14 «Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24

сентября 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, профессор,
заведующий кафедрой «Машины и
технологии литейного производства»
Федерального государственного
бюджетного образовательного учре-
ждения высшего образования «Вол-
гоградский государственный техни-
ческий университет»
научная специальность 05.16.04 –
Литейное производство

Николай Алексеевич
Кидалов

« 27 » октября 2023 г.

400005, Россия, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28
Телефон: +7 904 778 85 77. E-mail: nich@vstu.ru

