

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Терентьева Никиты Анатольевича «Исследование и разработка литейных технологий при получении дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – «Литейное производство»

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 127 наименований, 3 приложений, изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 18 таблиц. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Основные результаты работы достаточно полно представлены в научных публикациях (9 научных работ в журналах и сборниках трудов, в том числе 3 работы в изданиях из Перечня ВАК РФ), прошли апробацию на российских и международных научно-технических конференциях, защищены патентом РФ на изобретение.

1. Актуальность избранной темы

В настоящее время большое внимание научных организаций и промышленных предприятий всех стран с развитой индустрией и высокой инновационной активностью уделяется созданию дисперсно-упрочненных композиционных сплавов, поскольку их применение обеспечивает существенное повышение эксплуатационных характеристик изделий и достижение значительного экономического эффекта. Композиционные сплавы находят широкое применение в мировой практике при изготовлении ответственных изделий машиностроения, к которым предъявляются особые требования по износостойкости, жаропрочности, размерной стабильности и ряду других показателей. Главную проблему в технологии получения композиционных сплавов с управляемой структурой и заданными свойствами составляет проблема физико-химической совместимости матрицы и армирующих фаз при обеспечении необходимой степени их адгезионного взаимодействия. Одним из решений этой проблемы является разработка новых методов жидкофазного реакционного синтеза эндогенных армирующих соединений непосредственно в объеме матричного рас-

плава в процессе приготовления композиционного сплава в результате контролируемого химического взаимодействия между предварительно введенными компонентами-прекурсорами. Эндогенно-армированные композиционные сплавы отличаются высокой термодинамической стабильностью, более равномерным распределением синтезированных частиц, высокой адгезионной связью между армирующими компонентами и металлической матрицей.

Дальнейшее развитие работ в этом направлении связано с поиском новых систем армирования и разработкой технологических процессов, обеспечивающих формирование устойчивых высокодисперсных эндогенных соединений в широком интервале температур для адаптации новых технологий к условиям действующих литьевых производств, в том числе путем создания армирующих лигатур для дисперсного упрочнения сплавов. Закономерности формирования структуры, фазового состава и основных свойств дисперсно-упрочненных сплавов, а также особенности влияния обработки армирующими композиционными лигатурами на процессы структурообразования при кристаллизации стандартных алюминиевых сплавов до настоящего времени изучены недостаточно, что сдерживает их широкое промышленное освоение и обуславливает высокую актуальность темы диссертационной работы Терентьева Н.А.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность сформулированных в диссертации научных положений обеспечивается теоретической проработкой рассматриваемой проблемы на основе современных достижений литьевого производства и материаловедения композиционных сплавов, применением для решения поставленных задач адекватных и взаимодополняющих методов исследований, анализом полученных экспериментальных данных с привлечением широкого комплекса программно-аппаратных средств, опробованием разработанных научно-технических решений в производственных условиях. Выводы по диссертации согласуются с целью и задачами исследований.

Терентьевым Н.А. обоснована необходимость анализа современных методов упрочнения литьевых и деформируемых алюминиевых сплавов. Обозначены основные технологические проблемы, возникающие при приготовлении дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов с переходными и редкоземельными металлами. Показаны перспективы создания новых эндогенно-армированных композиционных сплавов на основе алюминия и описаны раз-

работанные к настоящему времени жидкофазные методы их получения. Отражены современные представления о процессах жидкофазного и твердофазного взаимодействия компонентов композиционных сплавов. На основе проведенного анализа сделан вывод о целесообразности дальнейшего совершенствования и развития метода жидкофазного реакционного синтеза эндогенных армирующих частиц в матричных расплавах для создания новых технологий получения дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов с использованием армирующих лигатур.

В соответствии с поставленными в работе задачами проведены термодинамические расчеты реакций синтеза армирующих фаз в исследуемых системах Al-Ti(Zr)-C и Al-B-C, свидетельствующие о возможности формирования целевых соединений в широком интервале температур. Методом лежащей капли получены температурные зависимости краевого угла смачивания карбидов B_4C , ZrC и TiC алюминиевым расплавом, по результатам анализа которых проведена оценка устойчивости композиционных систем. Разработана технология получения армирующих лигатур систем AlTi(Zr)-C и Al-B-C, в которых упрочняющие углеродсодержащие фазы в количестве до 5 мас.% синтезированы непосредственно в расплаве при температурах 1000-1100 °C с последующей кристаллизацией в металлических формах при скоростях охлаждения 50-150 °C/c.

Рентгенофазовым анализом подтверждено, что структурными составляющими полученных армирующих лигатур являются алюминиевый твердый раствор (α -Al), микроразмерные частицы ZrC, TiC, $C_2Al_3B_{48}$, равномерно распределенные в металлической матрице, алюминиды титана, циркония и бориды игольчатой или пластинчатой морфологии; показана взаимосвязь структурно-морфологических характеристик лигатурных сплавов с теплофизическими условиями затвердевания литых заготовок. Установлено, что армирующая лигатура системы Al-B-C наряду с повышением прочности технического алюминия марки А6 снижает его электросопротивление с 0,0301 до 0,0290 Ом·мм²/м за счет рафинирующего эффекта (связывание металлических примесей в мелкодисперсные соединения) при одновременном повышении механических свойств с 69 до 88 МПа в литом состоянии и со 140 до 172 МПа в холоднокатаном состоянии (при содержании углеродсодержащей боридной фазы 0,15 мас.%), поэтому её предложено использовать для получения дисперсно-упрочненных сплавов электротехнического назначения.

Получены новые экспериментальные данные по модифицирующей обра-

ботке алюминиевого сплава АД31 армирующими лигатурами систем AlTi(Zr)-С и Al-B-C. Показано, что применение предложенных лигатур позволяет повысить прочность сплава с 230 МПа (закалка и искусственное старение) до 267,3 МПа с одновременным исключением операции термообработки из технологического процесса. Даны рекомендации по использованию разработанных дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов для производства термически неупрочняемых прессованных полуфабрикатов.

Логическая завершенность диссертационной работы определяется доведением полученных результатов до практической реализации путем опытно-промышленных испытаний в условиях литейного производства ООО «ЛПЗ «Сегал» (г. Красноярск) и внедрением в учебный процесс ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» при подготовке магистров по направлениям 22.04.02 «Металлургия», 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство», что подтверждено соответствующими актами, приложенными к тексту диссертации.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Наиболее значимыми научными результатами, обладающими новизной, можно считать следующие положения:

- термодинамическими расчетами и экспериментальными исследованиями обоснован выбор прекурсоров для синтеза эндогенных карбидных и боридных армирующих соединений ZrC, TiC, C₂Al₃B₄₈ в алюминиевом расплаве при получении композиционных лигатур и дисперсно-упрочненных сплавов;
- за счет одновременного рафинирования технического алюминия бором и его упрочнения частицами C₂Al₃B₄₈, образующимися в реакциях *in-situ*, получен композиционный сплав электротехнического назначения, не требующий, в отличие от известного электротехнического алюминия марки А5Е, термической обработки для достижения заданного комплекса свойств;
- выявлено, что структурными составляющими полученных армирующих лигатур являются алюминиевый твердый раствор (α -Al), микроразмерные частицы ZrC, TiC, C₂Al₃B₄₈, равномерно распределенные в металлической матрице, алюминиды титана, циркония и бориды игольчатой или пла-

стинчатой морфологии; показана возможность измельчения структурных составляющих лигатуры в 5-10 раз с повышением скорости охлаждения с 50 до 450 °C/c;

- подтверждено, что повышение прочностных характеристик деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si (на примере АД31) при обработке их расплавов армирующими лигатурами связано с внесением в расплав микроразмерных частиц ZrC, TiC, C₂Al₃B₄₈, способных одновременно выполнять армирующую и модифицирующую функции.

Достоверность сформулированных научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов исследований структуры и физико-механических свойств опытных сплавов: синхронный термический анализ (STA 449C Jupiter), изучение поверхностных свойств расплавов методом покоящейся капли (вакуумная установка «Капля»), компьютерное моделирование процессов затвердевания (ProCAST), рентгеновская дифрактометрия (BRUKER D8 ADVANCE), металлографический анализ (Axio Observer), механические испытания по стандартным методикам (Inspekt 20кН) и др. Результаты исследований, полученные с применением различных методик, согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям. Достоверность результатов диссертационной работы также подтверждается публикациями в профильных рецензируемых научных изданиях, патентом РФ на изобретение, апробацией на конференциях различного уровня и опытными испытаниями в условиях действующего производства.

4. Рекомендации об использовании результатов диссертационных исследований

Проведенные Терентьевым Н.А. исследования позволили разработать технологические решения по получению дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов с применением армирующих лигатур, содержащих эндогенные частицы ZrC, TiC, C₂Al₃B₄₈, которые были успешно опробованы в условиях литейного производства ООО «ЛПЗ «Сегал». Отмечено, что использование разработанных лигатур Al-Ti(Zr)-C и Al-B-C для обработки сплава АД31 обеспечивает уровень механических свойств, сопоставимый с достигнутым при обработке прутковой лигатурой Al-5Ti-1B. Дисперсно-упрочненный алюминий, полученный с применением лигатуры Al-B-C ($\leq 0,3$ мас.% C₂Al₃B₄₈), можно использовать для производства электротехнической катанки взамен стандартных низкоциркониевых алюминиевых сплавов, уступающих ему по пока-

зателям электропроводности; при этом заданный уровень свойств нового сплава достигается без термической обработки.

Полученные в работе научно-технические результаты имеют важное практическое значение и могут быть рекомендованы для использования на промышленных предприятиях, занятых в сфере производства алюминиевых сплавов функционального и конструкционного назначения, а также отливок из них (ООО «КраМЗ», ООО «ЛПЗ «Сегал», ООО «КиК» и др.). Кроме того, результаты диссертационного исследования Терентьева Н.А. могут составить основу для дальнейшего изучения закономерностей процессов формирования структуры и свойств дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов различных систем в литом и деформированном состояниях.

5. Замечания по диссертационной работе

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

1. Учитывая поставленную автором цель работы, излишним является включение в литературный обзор (глава 1) детальных сведений по волокнистым композиционным материалам (стр. 20-22) и по пропитке тугоплавких каркасов при получении псевдосплавов (стр. 23-25). Вместе с тем, разделы работы 3.1, 4.1 и 4.5.1 целесообразнее было поместить в главу 1, поскольку они представляют собой обзор результатов, полученных другими исследователями.
2. На рис. 1.2 (стр. 29) приведена не «тройная диаграмма состояния Al-Ti-C», как следует из подрисуночной надписи, а ее изотермический разрез в плоскости концентрационного треугольника, при этом не указана температура, для которой он был получен.
3. При описании применяемых методик (глава 2) автор не указывает, какое оборудование и методики были использованы для измерения удельного электрического сопротивления опытных сплавов; полностью отсутствуют описание методики термодинамических расчетов и ссылки на исходные данные, использованные для их проведения; не указан фракционный состав порошков армирующих компонентов; нет сведений об использованных методах статистической обработки экспериментальных данных. Не вполне оправдано применение для измерения температуры алюминиевого расплава высокотемпературной вольфрам-рениевой термопары, рабочий диапазон которой составляет от 1000 до

1800 °С.

4. Несмотря на то, что работа посвящена исследованию и разработке литьевых технологий при получении дисперсно-упрочненных сплавов, в диссертации не приведено данных по литьевым свойствам разработанных материалов.
5. Недостатки редакционного характера: в тексте диссертации присутствуют опечатки (стр. 22, 49, 70, 85 и др.); на стр. 84 дважды повторяется одно и то же предложение; встречаются не вполне удачные и некорректные выражения («оптимальная структура», с. 4,5; «вели разливку в кокиль», с. 54); под номерами [84] и [94] в библиографическом списке приведены ссылки на один и тот же литературный источник; низкое качество отдельных рисунков (1.1, 3.1); на рисунках, отражающих экспериментальные результаты, не указаны доверительные интервалы.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту. Работа является актуальной, полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью, обоснованы на современном научном уровне и описывают завершенный цикл исследований.

6. Заключение о соответствии диссертации требованиям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Основные положения диссертации Терентьева Н.А. обоснованы, достоверны, имеют научную новизну и практическую значимость. Содержание диссертации в достаточной степени освещено в научной печати, в том числе в изданиях из Перечня ВАК. Научно-техническая новизна работы подтверждена патентом РФ. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными Министерством образования и науки РФ.

Тема диссертационной работы, изложенный материал и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 05.16.04 – «Литейное производство» в пунктах: 1. Исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических и служебных свойств материалов, как объектов и средств реализаций литейных технологий; 2. Исследование тепло- и массопереноса, гидродинамических, реологических и других

процессов, происходящих в расплавах, отливках и литейных формах; 4. Исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации; 14. Исследование процессов формирования свойств литейных сплавов и формовочных смесей.

В целом, представленная к защите диссертация является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, по актуальности решаемых задач, научной новизне и значимости основных положений и выводов, практической ценности достигнутых результатов соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Терентьев Никита Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – «Литейное производство».

Официальный оппонент
доцент кафедры «Технологии
функциональных и конструкционных
материалов» ФГБОУ ВО «Владimirский
государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),
кандидат технических наук, доцент

Прусов
Евгений Сергеевич

600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
тел. +7 (4922) 47-98-21
e-mail: eprusov@mail.ru

«31» 05 2018 г.

Подпись Прусова Евгения Сергеевича удостоверяется

Секретарь Ученого Совета ВлГУ



.Г. Коннова