УДК: 621.74:669.018.9

DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2021-2-43-59

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2022 г. В.Б. Деев^{1,2}, Е.С. Прусов³, Э.Х. Ри⁴

¹ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

³ Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

⁴ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Статья поступила в редакцию 18.08.21 г., доработана 02.10.21 г., подписана в печать 12.10.21 г.

Аннотация: Настоящий обзор посвящен известным теоретическим и экспериментальным результатам в области использования физических методов обработки расплавов при получении металломатричных композиционных материалов в условиях литейно-металлургических технологических процессов. Рассмотрены возможности, преимущества и недостатки различных способов физических воздействий с позиции их влияния на структурно-морфологические характеристики, физико-механические и эксплуатационные свойства литых композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов. Представлена классификация и дано развернутое описание физических методов обработки расплавов при получении металломатричных композитов в зависимости от состояния расплава в ходе обработки (при плавке, заливке, кристаллизации) и по физическому принципу накладываемых воздействий (тепловые, электромагнитные, кавитационные, механические и др.). Изложены современные представления о закономерностях и механизмах влияния обработки расплава физическими методами на процессы структуро- и фазообразования металломатричных композитов в литом состоянии. С качественных и количественных позиций описаны известные к настоящему времени эффекты воздействия на их структуру, в частности связанные с изменением смачиваемости частиц, их распределения, дисперсности и морфологии, а также структурного состояния матричного материала. Систематизированы данные о свойствах металломатричных композитов, полученных с применением физических воздействий на расплав при плавке и кристаллизации. Показаны перспективы развития и практического применения физических воздействий на расплавы при получении металломатричных композитов на основе различных матричных материалов и систем армирования, включая эндогенно-, экзогенно- и комплексно-армированные композиционные материалы. Обсуждаются приоритетные направления теоретических исследований и экспериментальных разработок, раскрываются дискуссионные области и вопросы в области получения металломатричных композитов с применением физических воздействий на расплавы при плавке и кристаллизации. На основе системного анализа ключевых проблем, ограничивающих широкое промышленное использование физических методов обработки расплавов, предложены области будущих исследований в данном направлении.

Ключевые слова: расплав, физические методы обработки расплава, литые металломатричные композиты, структурно-морфологические характеристики, литейно-металлургические технологии.

Деев В.Б. – докт. техн. наук, профессор факультета машиностроения и автоматизации Уханьского текстильного университета (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China),

гл. науч. сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы»,

профессор кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Прусов Е.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87). E-mail: eprusov@mail.ru.

Ри Э.Х. – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник, зав. кафедрой литейного производства и технологии металлов Тихоокеанского государственного университета (680035, г. Хабаровск, ул.Тихоокеанская, 136). E-mail: erikri999@mail.ru.

Для цитирования: Деев В.Б., Прусов Е.С., Ри Э.Х. Физические методы обработки расплавов металломатричных композитов: Современное состояние и перспективы. Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. No. 2. C. 43–59. DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2021-2-43-59.

Physical methods of processing melts of metal matrix composites: Current state and prospects

V.B. Deev^{1,2}, E.S. Prusov³, E.Kh. Ri⁴

¹Wuhan Textile University, Wuhan, P.R. China

² National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

³ Vladimir State University n.a. A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia

⁴ Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Received 18.08.2021, revised 02.10.2021, accepted for publication 12.10.2021

Abstract: This review focuses on the known theoretical and experimental results in the field of obtaining metal matrix composite materials by processing the melts using physical methods in the conditions of casting and metallurgical processes. The possibilities, advantages and disadvantages of various physical impact methods are considered from the standpoint of their effect on the structural and morphological characteristics, physicomechanical and operational properties of cast composite materials based on aluminum and its alloys. The paper provides a classification and a detailed description of physical methods used for melt processing when obtaining metal matrix composites depending on the melt state during processing (melting, pouring and crystallization) and according to the physical principle of the effects applied (thermal, electromagnetic, cavitation, mechanical, etc). The paper describes a contemporary view of the laws and mechanisms of the effect exerted by melt processing using physical methods on the structure and phase formation processes of as-cast metal matrix composites. The currently known effects of the impact on their structure are described from a qualitative and quantitative point of view, in particular, effects associated with a change in the wettability of particles, their distribution, dispersion and morphology, as well as with a change in the structural state of the matrix material. The paper systematizes the data on the properties of metal matrix composites obtained using physical impacts on the melt during melting and crystallization. The research shows the prospects for the development and practical application of physical impact methods for melts in the production of metal matrix composites based on various matrix materials and reinforcement systems including endogenously, exogenously and integrally reinforced composite materials. Priority areas of theoretical research and experimental development are discussed highlighting discussion areas and issues in the field of obtaining metal matrix composites using physical impacts on melts during melting and crystallization. Areas for future research in this field are proposed based on the systematic analysis of key problems limiting the widespread industrial use of physical methods for melt processing.

Keywords: melt, physical methods of melt processing, cast metal matrix composites, structural and morphological characteristics, casting and metallurgical technologies.

Deev V.B. – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the School of Mechanical Engineering and Automation of Wuhan Textile University (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China), Chief researcher of the Laboratory «Ultrafine-grained metallic materials», Prof. of the Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninkii pr., 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Prusov E.S. – Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of functional and constructional materials technology, Vladimir State University n.a. A. and N. Stoletovs (600000, Russia, Vladimir, Gorky str., 87). E-mail: eprusov@mail.ru.

Ri E.Kh. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief researcher, Head of the Department of foundry and metal technology, Pacific National University (680035, Russia, Khabarovsk, Tikhookeanskaya str., 136). E-mail: erikri999@mail.ru.

For citation: *Deev V.B., Prusov E.S., Ri E.Kh.* Physical methods of processing melts of metal matrix composites: Current state and prospects. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy).* 2022. Vol. 28. No. 2. P. 43–59 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2021-2-43-59.

Введение

Возможности дальнейшего улучшения физикомеханических и эксплуатационных свойств традиционных сплавов за счет легирования или модифицирования к настоящему времени практически исчерпаны [1—3]. Значительные резервы в их повышении открываются при реализации в материале принципа армированной гетерофазной структуры, положенного в основу создания литых металломатричных композиционных материалов (KM) [4]. Поэтому последние десятилетия характеризуются постоянно возрастающим интересом к литым композиционным материалам на основе цветных металлов и сплавов, упрочнение которых микро-, субмикро- и наноразмерными частицами обеспечивает высокие удельную прочность, модуль упругости, демпфирующие показатели, износостойкость и другие ценные свойства [5].

Применение композитов позволяет значительно повысить конструкционные и функциональные характеристики изделий в сравнении с традиционными сплавами и расширить температурносиловые интервалы их эксплуатации, обеспечивая снижение массы узлов и конструкций при одновременном повышении надежности и долговечности их работы [6]. Однако существующие технологии получения литых КМ, как правило, трудоемки и многостадийны, характеризуются низкой производительностью и большими энергозатратами. Во многом это обусловлено значительными технологическими трудностями, возникающими вследствие плохой смачиваемости экзогенных армирующих частиц металлическими расплавами и, как следствие, низкого уровня адгезионной связи на межфазных границах, коагуляции и деградации вводимых частиц, газонасыщения и окисления матричного сплава и других факторов.

При получении металломатричных композитов в условиях жидкофазных технологических процессов главной проблемой, которую приходится решать ученым и практикующим специалистам, являются сложности введения экзогенных неметаллических частиц в матричные металлические расплавы [7]. Эта проблема в значительной степени сопряжена с обеспечением физико-химической совместимости матрицы и армирующей фазы. Металломатричные КМ представляют собой термодинамически неравновесные гетерофазные системы, отличающиеся развитой сетью внутренних поверхностей раздела компонентов, поэтому их получение сопряжено с активным протеканием различных процессов межфазного взаимодействия между матричным расплавом и армирующими частицами [8].

Для получения бездефектной литой структуры с плотной адгезией между компонентами композита необходимо, с одной стороны, обеспечивать некоторую степень межфазного взаимодействия за счет различных технологических приемов для формирования адгезионных связей, а с другой ограничивать интенсивные химические реакции на межфазных границах для исключения возможной деградации армирующей фазы.

Известны различные способы совмещения металлических сплавов с дисперсной упрочняющей фазой: твердофазное или жидкофазное компактирование порошковых смесей, литейные технологии пропитки пористых каркасов из порошков или механическое замешивание наполнителей в расплав [9—11]. Наиболее распространенным в промышленности методом получения литых металломатричных КМ является механическое замешивание частиц армирующей фазы в металлические расплавы [12]. В таких процессах расплавленный металл перемешивается с помощью погруженного в него импеллера с одновременной подачей порошкообразных частиц. Совокупность технологических задач, которые приходится решать при получении композитов этим методом, включает обеспечение смачиваемости частиц матричным расплавом, предотвращение агломерации частиц, предотвращение флотации или седиментации частиц, а также интенсивного окисления и газонасыщения расплава при активном перемешивании импеллером [13]. Тенденция к агломерации усиливается при уменьшении размеров армирующих частиц, в особенности при переходе к использованию наноразмерных частиц [14].

В последнее время были разработаны новые способы получения металломатричных КМ, основанные на синтезе эндогенных армирующих фаз непосредственно в расплаве за счет протекания контролируемых экзотермических реакций между порошками исходных соединений-прекурсоров и металлическим расплавом [15, 16]. Эта технология получила название «реакционного литья», или in situ процесса. Композиты, полученные в таких процессах, обладают более высоким уровнем адгезионных связей на поверхностях раздела наполнитель-матрица благодаря близкому решеточному соответствию контактирующих фаз, термодинамической стабильности, лучшему распределению и дисперсности наполнителя, что в итоге обеспечивает более высокие механические и эксплуатационные свойства материала [17].

Процессы реакционного синтеза дают возможность регулировать фракционный состав и морфологические характеристики образующихся эндогенных армирующих фаз путем выбора технологических режимов жидкофазного совмещения компонентов [18]. Кроме того, методы in situ синтеза КМ хорошо адаптируются к условиям массового производства благодаря высокой производительности и относительно низкой стоимости готовых композитов. Новые более широкие возможности для регулирования свойств металломатричных КМ открываются при комплексном армировании матриц эндогенными и экзогенными наполнителями различных природы и размеров, в том числе наноразмерными, формирующимися при протекании реакций in situ между компонентами композиционных смесей и матричным расплавом [19].

В настоящее время в промышленных технологиях машиностроительного литья получают распространение способы внешних физических модифицирующих воздействий на расплавы высокотемпературные перегревы, электрический ток, магнитное поле, ультразвук, вибрация и др. [20], которые способствуют получению мелкозернистой структуры и повышению механических и эксплуатационных свойств отливок без введения специальных модифицирующих добавок. Основное достоинство физических воздействий заключается в том, что они не меняют химический состав расплава и не приводят к накоплению нежелательных примесей в литейных сплавах при дальнейших переплавах [21]. Применение некоторых их видов позволяет использовать повышенное количество вторичных материалов при плавке без потери качества получаемого сплава [22]. Многочисленные положительные эффекты, достигнутые к настоящему времени при воздействии на металлические расплавы внешних полей различной физической природы (ультразвуковых, электрических, магнитных и др.), позволяют рассматривать такие методы обработки расплавов перспективным направлением развития жидкофазных технологических процессов получения металломатричных КМ.

Широкое многообразие разработанных и опробованных на практике таких технологий требует обобщения и систематизации, а также выявления перспективных направлений их использования при получении литых металломатричных композитов, что и являлось целью настоящего обзора.

Классификация физических методов обработки расплавов металломатричных композитов

В табл. 1 на основе данных [23—25] предложена обобщенная классификация опробованных к настоящему времени физических методов обработки расплавов металломатричных композитов в зависимости от состояния расплава в ходе обработки и физического принципа накладываемых воздействий.

В настоящее время общепринятым является мнение о том, что металлические расплавы микронеоднородны, при этом их микронеоднородность обусловлена существованием термически устойчивых атомных микрогруппировок (кластеров). Известно [26], что на стадии приготовления любого жидкого сплава, даже после расплавления всех компонентов, в ней продолжается переход от различных типов ближнего порядка компонентов шихты к иной более однородной для формирующегося сплава атомной структуре. Это сопровождается изменением межчастичных взаимодействий и процессов атомной сегрегации. Изменение внешних условий, например температуры, приводит к изменению структуры ближнего порядка (межатомных расстояний, координационных чисел, геометрии расположенных атомов и размеров кластеров и т.д.) [27].

Сущность температурно-временной обработки заключается в нагреве расплава до определенной температуры и последующей изотермической

Таблица 1. Классификация наиболее распространенных физических методов обработки расплавов металломатричных композитов

Table 1. Classification of most widespread physical methods for processing melts of metal matrix composites

Физические воздействия	Состояние расплава (стадия технологического процесса)			
	Плавка	Заливка	Кристаллизация	
Тепловые	Термовременная обработка		_	
	Термоскоростная обработка	—		
Электромагнитные	Обработка магнитным полем	Обработка магнитным полем	Обработка магнитным полем	
	Облучение наносекундными электромагнитными импульсами	Обработка электрическим током	Обработка электрическим током	
	Магнитогидродинамическое перемешивание			
Кавитационные	Ультразвуковая обработка	Ультразвуковая обработка	Ультразвуковая обработка	
	Акустическая обработка	Вибрационная обработка	Вибрационная обработка	

выдержке при этой температуре [28]. Такая обработка может способствовать повышению степени гомогенизации расплава, что приводит при кристаллизации к более равномерной и дисперсной структуре сплава. Предполагается, что использование тепловых воздействий позволяет уменьшить микронеоднородное состояние расплава и за счет этого оказывает модифицирующее влияние на структуру получаемых сплавов, повышая служебные и механические свойства литых изделий.

Параметры перегрева (температура и выдержка расплава) при температурно-временной обработке определяются предварительными экспериментами. Часто для оценки влияния температуры на свойства сплава используют экспериментальные данные о физических свойствах расплавов (вязкость, плотность, поверхностное натяжение, электросопротивление) при варьируемых температурах нагрева и последующего охлаждения [29]. При появлении гистерезиса на кривых нагрева и охлаждения судят о необратимом изменении состояния структуры расплава и считают температуру проявления гистерезиса (и близкий к ней интервал) оптимальной температурой температурно-временной обработки. При этом существенное влияние на возможность проведения и эффективность температурно-временной обработки может оказать тип используемого плавильного агрегата [30]. Особенный интерес представляет использование температурно-временной обработки при применении повышенного количества низкосортной шихты при плавке.

Термоскоростная обработка [31] отличается от температурно-временной тем, что расплав после проведения перегрева и выдержки резко охлаждают до температуры заливки или температуры рафинирования добавками твердой шихты. Благодаря низкой скорости структурных изменений в жидкой фазе быстрое охлаждение расплава может в значительной степени подавлять трансформацию кластеров и других различных атомных группировок [32, 33]. Таким образом, резкое охлаждение перед разливкой позволяет более эффективно сохранить достигнутые изменения структуры расплава, фиксируя эффект перегрева [34].

Как показывает практика, электромагнитные воздействия (электрический ток, магнитное поле, наносекундные электромагнитные импульсы и т.д.) являются перспективными способами физического воздействия на металлические расплавы. Теоретические и технологические основы данных технологий развиваются в работах [35-37] и многих других. Сущность такой обработки заключается в том, что под влиянием электромагнитных воздействий на кристаллизующийся расплав существенно изменяются силы межатомного взаимодействия, определяющие качество литого металла, которое зависит от структуры и свойств расплава [38]. Наложение электромагнитных полей способствует переохлаждению расплава, росту скорости кристаллизации, при этом измельчается размер первичных кристаллов и повышается макроплотность литой структуры [39]. Однако эти технологии пока не получили широкого применения при изготовлении фасонных отливок, во многом вследствие недостаточной изученности зависимостей изменения уровня свойств от объема обрабатываемого металла.

Обработку расплавов электрическим током можно проводить как непосредственно в жидком состоянии, так и в процессе кристаллизации [40]. Для литейного производства большой интерес представляет обработка расплава при кристаллизации в литейной форме. Электрический ток при воздействии на расплав оказывает влияние на его течение в полости формы и на процессы тепломассопереноса, позволяя в определенной степени управлять структурой и свойствами отливок. Наряду с этим значительные успехи в данном направлении достигнуты при воздействии электрическим потенциалом на металлические материалы в процессах деформационной обработки литых заготовок [41, 42].

Применение электрических и магнитных полей при плавке и кристаллизации сплавов для получения модифицирующего эффекта изучалось на протяжении многих лет [43]. Проведенные исследования позволили установить существенное повышение механических свойств при использовании различных технологий обработки расплавов, основанных на действии электромагнитных полей, в частности вращающегося электромагнитного поля, импульсных магнитных осцилляций, наносекундных электромагнитных импульсов и др. [44, 45] Вместе с тем исследования по использованию электрических и магнитных полей для улучшения структурных параметров литых металломатричных композитов пока представлены ограниченно. При этом имеющиеся достижения по эффективному управлению структурой неармированных металлических сплавов составляют основу для успешного использования электромагнитных воздействий при вводе микро- и наноразмерных армирующих частиц в расплавы.

Системы электромагнитного перемешивания расплавов оказывают бесконтактное воздействие на жидкий металл [46]. В зависимости от разницы плотностей с матричным расплавом армирующие частицы могут быть подвержены флотации либо седиментации вследствие сил гравитации. Потоки жидкого металла, возникающие при электромагнитном перемешивании, предотвращают седиментацию частиц, способствуя их более равномерному распределению в объеме расплава. Многочисленными исследованиями было показано, что импульсные электромагнитные поля при воздействии на расплавленные металлы позволяют не только существенно измельчить первичные зерна, но и менять их морфологию за счет фрагментации дендритов [47-50].

При наложении импульсных магнитных полей параллельно поверхности расплава создается сила Лоренца из-за взаимодействия импульсного магнитного поля и индуцированного электрического тока, вызывающая вибрацию жидкого металла, что приводит к измельчению зерна [51]. Однако детальные механизмы модифицирующего воздействия такой обработки на структуру алюминиевых сплавов остаются дискуссионными. Исследования многих специалистов, работающих в этих направлениях в последние десятилетия, направлены преимущественно на изучение влияния импульсных электромагнитных полей на размеры и морфологию структурных составляющих в алюминиевых сплавах, а также на перераспределение легирующих элементов в процессах микро- и макросегрегации во взаимосвязи со свойствами и характеристиками получаемых литых заготовок [52-55].

Ультразвуковые волны высокой интенсивности способны индуцировать в металлических расплавах области кавитации и акустические потоки [56]. Применительно к металломатричным композитам подобные эффекты сопровождаются разрушением конгломератов частиц, дроблением крупных частиц на более мелкие, дегазацией и измельчением структуры матричного сплава [57]. Недостатками метода ультразвуковой обработки расплавов является растворение материала излучателя за счет взаимодействия с обрабатываемым расплавом при высокой температуре, что может приводить к изменению акустических характеристик и снижению качества обработки, а также к насыщению расплава нежелательными примесями. Проблема растворения излучателей частично решается применением для их изготовления тугоплавких материалов на основе ниобия, тантала и др.

Влияние обработки расплавов физическими методами на процессы структуро- и фазообразования металломатричных композитов

По результатам анализа и обобщения экспериментальных данных, приведенных в работах [58—61 и др.], в табл. 2 систематизированы методы физических воздействий, опробованные к настоящему времени при получении литейных композитов на основе алюминиевых сплавов. При анализе учитывали существенные различия в поведении армирующих частиц под влиянием физических воздействий в зависимости от их происхождения и связанное с этим разделение металломатричных КМ на эндогенно-армированные (*in situ*) и экзогенно-армированные (*ex situ*) [62].

Таким образом, выбор методов физических воздействий на расплавы определяется целевыми результатами обработки, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от типа обрабатываемого металломатричного композита по принципу реализации способа армирования. На поверхности экзогенных частиц могут присутствовать различные примеси и загрязнения, в частности оксидные слои и адсорбированные газы, существенно ухудшающие смачиваемость вводимых частиц металлическим расплавом.

Применение внешних воздействий позволяет в определенных случаях вводить в расплавы экзогенные частицы, имеющие контактный угол смачивания матричным расплавом более 90°. Эндогенные армирующие частицы характеризуются термодинамической совместимостью с матрицей, имеют чистые межфазные границы с плотной адгезионной связью между компонентами. Недостатками эндогенного армирования являются сложность контроля реакций образования частиц в расплаве и их склонность к агломерации, включая оттеснение на границы зерен при кристаллизации, поэтому в данном случае использование внешних воздействий должно быть ориентировано прежде всего на повышение равномерности распределения армирующих частиц.

Температурно-временная обработка (обработка перегревом) является одним из вполне очевидных способов снижения контактного угла смачи-

Таблица 2. Влияние обработки расплавов физическими воздействиями на структуру металломатричных композитов

Table 2. Effect of melt processing by physical impacts on the structure of metal matrix composites

Метод обработки	Тип композита	Качественный эффект	
	in situ	Уменьшение средних размеров эндогенных армирующих фаз, изменение их морфологии на более компактную	
Температурно-временная	ex situ	Улучшение смачиваемости частиц, усиление адгезионной связи на межфазных границах «матрица – армирующая фаза»	
	in situ	Диспергирование армирующих фаз, разрушение конгломератов, улучшение равномерности распределения частиц в объеме отливки	
Ультразвуковая	ex situ	Улучшение смачиваемости частиц, усиление адгезионной связи на межфазных границах «матрица — армирующая фаза», разрушение конгломератов, улучшение равномерности распределения частиц в объеме отливки	
2	in situ	Интенсификация процессов образования эндогенных армирующих фаз, увеличение общего количества армирующих частиц	
Электромагнитная	ex situ	Разрушение конгломератов, улучшение равномерности распределения частиц в объеме отливки	
Вибрация при заливке	ex situ	Разрушение конгломератов, улучшение равномерности распределения частиц в объеме отливки	

вания при вводе экзогенных частиц в металлические расплавы. При температурно-временной обработке *ex situ* KM (экзогенно-армированных композитов) ее воздействие может проявляться по-разному в зависимости от физико-химической природы применяемых матричных сплавов и армирующих компонентов, а также технологических режимов процесса. Достигаемый при этом эффект определяется интенсификацией процессов межфазного взаимодействия между алюминиевым расплавом и вводимыми частицами армирующей фазы [63].

Авторами [64] отмечено, что повышение температуры расплава и продолжительности изотермической выдержки существенно улучшает смачивание частиц SiC жидким алюминием за счет уменьшения краевого угла смачивания на границе контакта фаз. Однако длительная выдержка композиционных расплавов системы Al—SiC при высокой температуре может приводить к деградации армирующих компонентов вследствие образования различных нежелательных продуктов взаимодействия [65], к примеру карбида алюминия, по реакции 4Al + 3SiC = Al₄C₃ + 3Si.

В этой связи при промышленном применении температурно-временной обработки для получения экзогенных композиционных сплавов необходимо уделять особое внимание контролю технологических параметров процесса, не допуская продолжительных выдержек расплава до разливки. Эти вопросы требуют проведения дополнительных исследований для каждой системы «матрица — армирующая фаза».

Подтверждено положительное влияние температурно-временной обработки эндогенно-армированных композиционных расплавов на структурно-морфологические характеристики материалов системы Al—Mg₂Si [66]. Наилучший модифицирующий эффект отмечен при изотермической выдержке расплава в течение 15 мин при температуре 950 °C. При этом форма первично кристаллизующихся силицидов магния меняется со скелетообразной на полигональную с одновременным уменьшением средних размеров частиц.

В работе [67] показано влияние высокотемпературных перегревов на микроструктуру композита Al—Si—Cu/Mg₂Si. Расплав перегревали до температур 720, 820, 920 и 1020 °C с выдержкой в течение 20 мин и последующим охлаждением в тиглях на воздухе до 700 °C. Увеличение температуры перегрева расплава Al—Si—Cu/Mg₂Si при температурно-временной обработке с 720 до 1020 °C сопровождалось изменением морфологии первичных кристаллов Mg₂Si с грубых дендритов на равноосные частицы и уменьшением их средних размеров со 150 до 40 мкм.

Несмотря на то, что работы по температурновременной обработке расплавов металломатричных композитов пока представлены весьма ограниченно, здесь может быть использован накопленный опыт изучения процессов активации нерастворимых примесей при высокотемпературных перегревах и изотермической выдержке алюминиевых расплавов. К примеру, перегрев увеличивает смачиваемость частиц оксида алюминия [68], что позволяет им выступать в качестве подложки для зарождения кристаллов твердого раствора. Повышение смачиваемости оксидных включений может быть также обусловлено полиморфными превращениями оксида алюминия из модификации γ -Al₂O₃ в δ -Al₂O₃, протекающими при температурах выше 800 °С [69]. Таким образом оксид алюминия вместе с другими нерастворимыми частицами может вовлекаться в процесс кристаллизации, хотя при обычных условиях плавки и литья он в нем не участвует напрямую. Аналогичные эффекты могут быть достигнуты при температурно-временной обработке композитов, однако специфика воздействия такой обработки на структуру КМ конкретных систем и составов, включая выпускаемые в промышленности (Al-SiC, Al-Al₂O₃, Al-B₄C), остается пока неизученной.

Методы электромагнитной обработки расплавов представляют значительный интерес для улучшения структурных характеристик металломатричных композитов, армированных наночастицами. Армирующие частицы нанометровых размеров обеспечивают скачкообразное повышение свойств материала за счет одновременного действия сразу нескольких механизмов упрочнения, включающих упрочнение по Оровану, зернограничное упрочнение и др. [70]. Однако в металлических расплавах наночастицы склонны к флотации и образованию агломератов вследствие действия сил Ван-дер-Ваальса. Интенсивное перемешивание за счет действия сил Лоренца является одним из эффективных путей улучшения равномерности распределения наночастиц в расплаве. Кроме того, электромагнитное перемешивание оказывает модифицирующее действие на структуру сплавов за счет разрушения дендритных ветвей, которые могут выступать в качестве подложек для кристаллизации новых зерен твердого раствора [71].

В работе [72] алюмоматричные композиты с эндогенными частицами TiB₂ синтезированы за-

мешиванием в расплав смеси солей K₂TiF₆ и KBF₄ при t = 850 °C. В традиционных условиях плавки и литья без наложения внешних воздействий частицы ТіВ₂ склонны к сегрегации на межзеренных границах за счет оттеснения фронтом кристаллизации. Применение роторного электромагнитного перемешивания при кристаллизации расплава способствует измельчению зерна матричного сплава и частиц ТіВ₂ с одновременным улучшением равномерности их распределения: от 80 до 90 % сформированных частиц находились в размерном диапазоне 100-150 нм. Турбулентный эффект от электромагнитного перемешивания приводит к нарушению предпочтительного роста кристаллов ТіВ₂ в направлении <0001> и образованию нерегулярной блочной морфологии с призматическими гранями на базисной плоскости {0001}.

Более распространенным промышленным способом формирования частиц TiB₂ в алюминиевом расплаве является использование лигатур. Однако во многих случаях такие методы сопровождаются агломерацией частиц и формированием крупных включений интерметаллидных фаз, что снижает уровень эффективность армирования и модифицирования [73-75]. В работе [76] были получены композиты системы 7055/ТіВ₂ с использованием лигатуры Al—3В и титанового порошка при воздействии на расплав импульсного магнитного поля. Обработка композиционных расплавов магнитным полем приводила к образованию эндогенных частиц TiB₂ размером менее 1 мкм с гексагональной морфологией и плотной межфазной связью с матрицей. Сильное вибрационное воздействие магнитного поля способствует предотвращению кластеризации образующихся частиц и интенсифицирует диффузионные процессы, что приводит к формированию частиц субмикронных размеров. После обработки также зафиксировано измельчение средних размеров зерна твердого раствора с 20 до 10 мкм.

Авторами [77] показано, что обработка расплава в течение 20 мин импульсным магнитным полем с частотой 100 кГц и длительностью импульса 10 мс способствует ускорению химических реакций образования наноразмерных эндогенных армирующих частиц Al_2O_3 и Al_3Zr в системе $A356-Zr(CO_3)_2$. Изменяющееся магнитное поле вызывает интенсивные конвективные потоки, способствующие равномерному распределению частиц в объеме расплава.

Одним из технологических вариантов улучшения равномерности распределения экзогенных

Литейное производство

частиц SiC в алюмоматричных композитах является применение комбинированного электромагнитно-механического перемешивания, предложенное в работе [78]. Используя специальное трехлопастное замешивающее устройство и электромагнитный перемешиватель мощностью 25 кВт, авторы вводили частицы SiC со средним размером 20 мкм в расплав Al-1,5мас.% Si при температуре твердожидкого состояния 620 °С и скорости замешивания 300-600 об./мин для получения композитов состава Al-4,25об.%SiC. Зафиксированная разница между объемной долей SiC в верхней и нижней частях слитка была незначительной и составляла ~0,04 об.%, что свидетельствовало об устранении кластеризации частиц. Обозначенный подход также был использован для успешного преодоления проблемы захвата газов при высокоскоростном (2200-2700 об./мин) механическом замешивании экзогенных армирующих частиц Al₂O₃, приводящем к повышенной пористости отливок [79]. При этом объемная доля пористости в композитах Al—Al₂O₃ была сокращена до 0,036 об.%.

В настоящее время уже стали традиционными такие области применения ультразвука (УЗ) в металлургии, как дегазация расплавов и модифицирующая обработка [80]. Возможность принципиального изменения структуры сплавов с помощью ультразвуковой обработки в режиме акустической кавитации подтверждена многолетними исследованиями проф. Г.И. Эскина [81]. УЗ-обработка жидкого и кристаллизующегося расплава разрушает ветви растущих дендритов, фрагменты которых выступают как дополнительные центры кристаллизации. Возникающий при этом избыток зародышей кристаллизации обусловливает формирование предельно измельченной недендритной структуры с размером зерна, приблизительно равным размеру дендритного параметра.

Известно, что для создания акустической кавитации в расплавах легких сплавов интенсивность ультразвука должна быть не менее 80 Вт/см² [82]. Предполагая, что поверхность волновода-излучателя полностью смачивается расплавом, интенсивность может быть выражена следующим образом [83]:

$$I = \frac{1}{2} \rho_L c_L (2\pi f A_0)^2$$

где f — частота колебаний, ρ_L — плотность металлического расплава, c_L — скорость распространения звуковых волн в расплаве, A_0 — начальная амплитуда колебаний.

Расчеты, выполненные по приведенному выражению, позволяют установить теоретический характер изменения интенсивности УЗ-обработки в зависимости от частоты колебаний и начальной амплитуды с учетом вида обрабатываемого сплава.

Конкретных примеров реализации ультразвуковых технологий при получении литых металломатричных композитов в научной литературе пока представлено сравнительно немного, однако эти методы постепенно начинают привлекать все большее внимание исследователей и практикующих специалистов. При этом наибольший интерес вызывает применение УЗ-обработки для введения экзогенных наночастиц в металлические расплавы, а также для деагломерации кластеров в эндогенно-армированных нанокомпозитах.

В частности, в работе [84] УЗ-обработку расплава применяли для получения нанокомпозитов на основе Al—7Si—0,3Mg с добавлением 0,5 мас.% Си и 1 мас.% наночастиц Al₂O₃. Использовали ниобиевый зонд, работающий на частоте 20 кГц с максимальной мощностью 600 Вт. Волновод погружали в матричный расплав на глубину 12 мм при температуре 700 °С и накладывали ультразвуковые колебания с частотой 20 кГц и амплитудой 60 мкм в течение 15 мин при одновременной подаче подогретых навесок наночастиц, завернутых в алюминиевую фольгу. Отмечено совместное модифицирующее действие наночастиц и УЗ-обработки на все фазовые составляющие, включая первичные дендриты, эвтектический кремний и включения Al₂Cu.

Авторы [85] исследовали влияние ультразвуковых колебаний на дисперсность и распределение частиц графита при получении композитов Al-2об.% графита методом механического замешивания. Порошок графита со средним размером частиц 21 мкм вводили в алюминиевый расплав с помощью импеллера с последующей УЗ-обработкой при варьировании продолжительности процесса от 1 до 5 мин. При этом использовали излучатель из сплава Ti-6Al-4V при частоте 20 кГц и мощности 2,5 кВт. Показано, что такое воздействие в течение 1 мин резко сокращает пористость материалов и разрушает скопления графитовых частиц. Дальнейшее увеличение времени процесса не оказывает существенного влияния на изменение пористости, однако влияет на размер и морфологию графитных включений, которые при обработке в течение 5 мин уменьшаются до 100-130 нм.

Влияние различной температуры УЗ-обработки изучено в работе [86] при получении алюмоматричных композитов с 1 мас.% Al_2O_3 . Порошки Al и Al_2O_3 ($d \sim 65$ нм) предварительно смешивали в шаровой мельнице и спекали для получения композитного порошка. Матричный расплав перегревали до 750 °C, затем в течение 10 мин замешивали полученный порошок с помощью импеллера. После этого накладывали ультразвуковые колебания с частотой 20 кГц в течение 60 с при мощности 300 Вт и температурах расплава 650, 670, 680 и 700 °C. Показано, что обработка при t = 670 °C приводит к наилучшим параметрам микроструктуры при среднем размере зерна сплава 25 мкм.

В работе [87] для получения металломатричных нанокомпозитов Al—Al₂O₃ ($d \sim 10$ нм) использован бесконтактный метод УЗ-обработки расплава в процессе плавки и кристаллизации. Алюминиевый расплав, перегретый до температуры 950 °С, заливали с одновременной подачей наночастиц оксида алюминия в подогретую форму, помещенную в ультразвуковую камеру. Обработку проводили УЗ-волнами с частотой 35 кГц в течение 5 мин. Описанный подход позволяет преодолеть ряд ограничений, характерных для контактных методов УЗ-обработки расплавов, в частности связанных с растворением зонда за счет взаимодействия с расплавом и частичной агломерацией наночастиц после удаления зонда из расплава перед началом кристаллизации.

Значительный интерес представляет оценка потенциала УЗ-обработки для решения проблем неконтролируемого роста и агломерации эндогенных наночастиц. При этом сообщается о положительных эффектах как при наложении ультразвуковых полей непосредственно при протекании in situ процессов, так и при обработке эндогенно-армированных композитов с уже сформированными армирующими фазами. К примеру, после in situ peакции в системе $7055 - K_2 TiF_6 - KBF_4 c$ одновременной УЗ-обработкой высокой интенсивности в кавитационном режиме были сформированы частицы ТіВ₂ размером 80—120 нм, в то время как без такого воздействия в той же системе размеры образующихся частиц составляли от 0,5 до 1 мкм [83]. Показано, что вследствие циркуляций акустического потока возникает эффект перемешивания в макроскопических масштабах, поэтому армирующие фазы перемещаются по объему расплава.

В работе [88] показано, что УЗ-обработка расплава Al/TiB₂ после *in situ* реакции позволяет добиться значительного уменьшения эндогенных частиц TiB₂ (с 850 до 290 нм), а также разрушения их агломератов и улучшения равномерности распределения в матрице. В этих исследованиях композит Al/TiB₂ был получен замешиванием смеси солей K₂TiB₆ и KBF₄ в алюминиевый расплав при температуре 800 °C с последующим переплавом. Ультразвуковую обработку проводили с частотой 20 кГц при температуре 750 °C, варьируя продолжительность процесса от 1 до 5 мин.

Вместе с тем подбор условий и режимов УЗ-обработки расплавов металломатричных композитов является более сложной задачей в сравнении с обработкой стандартных алюминиевых сплавов. Так, при изучении поведения расплава методом синхротронной радиографии при УЗ-обработке композитов Al—10 мас.% Си с наночастицами Al₂O₃ было показано, что их добавление значительно усиливает образование кавитационных пузырьков и интенсифицирует перемешивание расплава вблизи волновода [89]. Одним из нежелательных последствий возникающей при этом турбулентности может быть вторичная агломерация частиц [90].

Таким образом, явления локализации областей кавитации и динамических эффектов при УЗ-обработке расплавов металломатричных КМ во многих случаях затрудняют технологическую реализацию ультразвуковых методов по сравнению с обработкой неармированных сплавов, что обусловливает необходимость оптимизации параметров процесса для различных типов металломатричных композитов.

Приведенные примеры убедительно свидетельствуют о технологической целесообразности применения УЗ-обработки при введении армирующих частиц в алюминиевые расплавы. Имеющиеся экспериментальные данные подтверждают улучшение смачиваемости и равномерности распределения наночастиц по объему расплава за счет разрушения агломератов. Активация поверхности наночастиц при обработке повышает термодинамическую устойчивость системы в целом. Дополнительным результатом является сокращение пористости композиционных отливок за счет дегазирующего эффекта УЗ-обработки, а также модифицирующее влияние на структуру сплава, что способствует дополнительному приросту механических и эксплуатационных свойств. Однако промышленная реализация ультразвуковых технологий при синтезе литых металломатричных композитов пока сдерживается отсутствием рекомендаций по подбору оптимальных режимов обработки в зависимости от состава композиционных материалов с учетом физико-химической природы компонентов легирующего и армирующего комплексов.

Формирование свойств металломатричных композитов при обработке расплавов физическими методами

Представленные в литературе данные о влиянии различных физических методов обработки расплавов на механические и эксплуатационные свойства металломатричных композитов пока ограниченны и фрагментарны. Наиболее широко освещены вопросы формирования механических свойств литых КМ после УЗ-обработки расплавов.

Так, показано, что введение 1 мас.% наночастиц Al₂O₃ и SiC с помощью ультразвукового воздействия на расплав алюминиевого сплава марки А356 с частотой 18 кГц приводит к повышению прочности на растяжение в среднем с 228 МПа (неармированный сплав) до 263 МПа (добавление Al₂O₃, *d* ~ 20 нм) и 283 МПа (SiC, 50 нм) при одновременном увеличении относительного удлинения с 4,0 % до 6,3 % и 11,2 % соответственно [91]. В работе [92] сообщается о получении при аналогичных условиях литых алюмоматричных КМ составов 6061 + 1 мас.% Al₂O₃ и 6061 + 1 мас.% SiC, прочность на растяжение которых составила 158,6 и 163,5 МПа соответственно, в то время как достигнутый уровень пластичности был ~13 % для обоих случаев. При этом выявлено, что добавление наночастиц привело к изменению преобладающего механизма разрушения материала с хрупкого на пластичный.

Ультразвуковая обработка эндогенно-армированных композитов Al/TiB_2 приводит к существенному приросту предела текучести материала в сравнении с необработанным состоянием [93]. В частности, после УЗ-обработки предел текучести повышается на 35,3, 43,5 и 60 % при времени обработки 60, 120 и 240 с соответственно. Предполагается, что устранение агломератов армирующих частиц приводит к увеличению их общего количества и более равномерному распределению по объему композита, что способствует более эффективному упрочнению по механизму Орована и за счет разницы коэффициентов теплового расширения матрицы и армирующей фазы.

Выявлена экспоненциальная зависимость степени упрочнения алюмоматричных композитов, содержащих 1 об.% наночастиц SiC, от продолжительности ультразвуковой обработки (*t*_{UST}) расплава [94]:

$$H = 4,92(1,02^{t_{UST}})$$

Здесь предэкспоненциальный множитель отражает вклад армирования наночастицами SiC в композите, полученном без применения ультразвуковых волн.

В работе [95] УЗ-обработка расплава с частотой 20 кГц и продолжительностью 3 мин использована для разрушения агломератов наночастиц SiC в структуре композита, полученного механическим замешиванием гранул Al/SiC. Показано, что при добавлении 2 мас.% SiC (d ~ 40 нм) в сплав А356 предел прочности на растяжение и относительное удлинение в литом состоянии повышаются до 260 МПа и до 5,3 %, что соответственно на 22 и 24 % выше в сравнении с матричным сплавом. В ходе анализа выявлено, что преобладающими механизмами повышения прочностных характеристик полученных КМ являются упрочнение по Оровану за счет ограничения движения дислокаций и по Холлу-Петчу за счет модифицирующего воздействия наночастиц SiC на зерна твердого раствора.

Сравнительная оценка механических свойств композитов AA6061/SiC (10 мкм) с различным содержанием армирующей фазы (от 5 до 20 мас.%), изготовленных традиционным методом механического замешивания и путем замешивания с дополнительной обработкой расплава ультразвуком при частоте 20 кГц, показала лишь незначительное улучшение прочности на растяжение КМ при использовании ультразвуковых воздействий (в пределах 20—30 МПа) [96].

Таким образом, относительный прирост прочностных характеристик металломатричных нанокомпозитов после УЗ-обработки расплавов во всех случаях значительно выше, чем при обработке КМ с микроразмерными частицами.

Перспективы развития и практического применения физических методов обработки расплавов металломатричных композитов

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что физические методы обработки расплавов являются эффективным средством управления структурой сплавов для достижения заданного качества литых заготовок и имеют значительные перспективы промышленного использования при получении не только стандартных сплавов, но и литых металломатричных композитов.

Большое значение с позиций практического применения методов физической обработки расплавов металломатричных КМ имеют результаты, полученные в рамках исследовательского проекта Европейского союза ЕхоМеt (2012-2016), ориентированного на получение перспективных материалов на основе легких сплавов с добавлением армирующих наночастиц путем воздействия на расплавы различных внешних полей (электромагнитных, ультразвуковых и др.) для получения уровня свойств, не достижимого в традиционных литейно-металлургических процессах. Были проведены масштабные исследования, позволившие разработать параметры обработки расплавов для обеспечения смачивания и деагломерации субмикронных и наноразмерных частиц при введении их в жидкие сплавы, способствующие равномерному распределению армирующей фазы в объеме расплава и в структуре литой заготовки [97—99].

Большой практический интерес представляют работы по изучению влияния физических воздействий на кристаллизующиеся расплавы в условиях специальных методов литья. К примеру, было показано, что наложение статического магнитного поля при центробежном литье функционально-градиентных композитов Al/SiC повышает равномерность распределения частиц в отливке [100], что позволяет использовать такие подходы для управления градиентом объемного содержания армирующих частиц.

В последние годы отдельное внимание лидирующих научных коллективов уделяется созданию комбинированных методов внешних воздействий на расплавы, совмещающих физические (например, ультразвук) и химические (например, введение модифицирующих лигатур) методы обработки расплавов. Один из примеров такого подхода показан в работе [101], где исследовано влияние комплексной ультразвуковой инокулирующей обработки на изменение структуры и свойств алюминия технической чистоты, дополнительно модифицированного лигатурой Al-3Ti-1B. Показано, что комбинированная обработка повышает эффективность зародышеобразования в расплавах, способствуя активации дополнительно введенных центров кристаллизации, их смачиванию, деагломерации и равномерному распределению в расплаве.

С учетом достижений в этом направлении значительный интерес представляет изучение влияния комбинированной обработки физическими и химическими методами на формирование эндогенных армирующих фаз в металломатричных КМ. Для экзогенно-армированных композитов в связи с фиксированными размерами и морфологией вводимых армирующих частиц химические методы эффективны только для улучшения их смачиваемости матричным расплавом (например, за счет ввода поверхностно-активных модифицирующих добавок), поэтому в этом случае целесообразно комбинировать физические воздействия различной природы с целью повышения эффективности обработки.

Потенциал физических методов обработки расплавов металломатричных КМ реализован пока далеко не в полной мере. Наибольшее внимание в последние годы уделялось ультразвуковым и электромагнитным методам обработки композиционных расплавов. Опубликованные данные подтверждают, что применение физических воздействий позволяет успешно решить многие технологические проблемы, характерные для традиционных литейно-металлургических процессов получения металломатричных КМ методами механического замешивания и жидкофазного реакционного синтеза. Вместе с тем недостаточно изучены вопросы влияния внешних физических полей на формирование структуры композиционных отливок, получаемых специальными методами литья. Весьма ограниченно представлены результаты по термоскоростной обработке расплавов металломатричных КМ, влиянию тепловых воздействий на изменение их структуры и свойств.

Учитывая современные тенденции в данной области, дальнейшие разработки должны быть ориентированы на дополнение и расширение существующих в настоящее время в мировой науке представлений о строении металлических расплавов и композитов на их основе, особенностей формирования структуры при кристаллизации литых материалов и возможностей управления этими процессами за счет наложения физических воздействий на расплавы для достижения заданных механических и эксплуатационных свойств.

Заключение

Опыт передовых стран мира показывает, что существенные успехи в преодолении различных технологических ограничений в вопросах получения металломатричных композитов литейно-металлургическими методами могут быть достигнуты при использовании физических методов обработки композиционных расплавов. Опубликованные данные убедительно демонстрируют возможности целенаправленного управления структурой и свойствами литых металломатричных композитов в условиях реализации различных структурных схем и масштабных уровней их армирования фазами эндогенного и экзогенного происхождения за счет наложения физических воздействий на композиционные расплавы.

Проведенный обзор свидетельствует об актуальности и перспективности продолжения работ в области совершенствования и оптимизации технологий обработки расплавов металломатричных композитов методами физических воздействий с целью их широкого внедрения в машиностроение и другие отрасли промышленности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50033.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-18-50033.

Литература/References

- Xue D., Balachandran P., Hogden J., Theiler J., Xue D., Lookman T. Accelerated search for materials with targeted properties by adaptive design. Nat. Commun. 2016. Vol. 7. Art. 11241. DOI: 10.1038/ncomms11241.
- Srinivasan S., Broderick S. R., Zhang R., Mishra A., Sinnott S. B., Saxena S. K., LeBeau J. M., Rajan K. Mapping chemical selection pathways for designing multicomponent alloys: an informatics framework for materials design. *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. Art. 17960. DOI: 10.1038/srep17960.
- Vojtech D. Challenges for research and development of new aluminum alloys. *Metalurgija*. 2010. Vol. 49. No. 3. P. 181–185.
- Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites. Annu. Rev. Mater. Res. 2010. Vol. 40. Iss. 1. P. 243–270. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.
- Rohatgi P.K., Ajay Kumar P., Chelliah N.M., Rajan T.P.D. Solidification processing of cast metal matrix composites over the last 50 years and opportunities for the future. *JOM*. 2020. Vol. 72. No. 8. P. 2912–2926. DOI: 10.1007/ s11837-020-04253-x.
- 6. *Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., Varachia F.M.* Aluminum matrix composites for industrial use: Advanc-

es and trends. *Procedia Manuf.* 2017. Vol. 7. P. 178–182. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.045.

- Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. J. Manuf. Process. 2020. Vol. 59. P. 131–152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010.
- Sijo M.T., Jayadevan K.R. Analysis of stir cast aluminium silicon carbide metal matrix composite: A comprehensive review. *Proc. Technol.* 2016. Vol. 24. P. 379–385. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.05.052.
- Pramanik S., Cherusseri J., Baban N.S., Sowntharya L., Kar K.K. Metal matrix composites: Theory, techniques, and applications. In: Composite materials (Ed. Kar K.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. P.369–411. DOI: 10.1007/978-3-662-49514-8_11.
- Singh L., Singh B., Saxena K.K. Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): An overview. Adv. Mater. Process. Technol. 2020. Vol. 6. Iss. 2. P. 441–457. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1729603.
- Parikh V.K., Badheka V.J., Badgujar A.D., Ghetiya N.D. Fabrication and processing of aluminum alloy metal matrix composites. *Mater. Manuf. Process.* 2021. Vol. 36. Iss. 14. P. 1604—1617. DOI: 10.1080/10426914.2021.1914848.
- Kandpal B.C., Kumar J., Singh H. Manufacturing and technological challenges in stir casting of metal matrix composites: A review. *Mater. Today Proc.* 2018. Vol. 5. Iss. 1. P. 5–10. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.046.
- Suthar J., Patel K.M. Processing issues, machining, and applications of aluminum metal matrix composites. *Mater. Manuf. Process.* 2018. Vol. 33. Iss. 5. P. 499–527. DOI: 10.1080/10426914.2017.1401713.
- Madhukar P., Selvaraj N., Rao C.S.P., Mishra S.K. Fabrication of light weight metal matrix nanocomposites using ultrasonic cavitation process: A state of review. *Mater. Sci. Forum.* 2019. Vol. 969. P. 882–888. DOI: 10.4028/www. scientific.net/msf.969.882.
- Jiao L., Zhao Y.T., Wang X.L., Wu Y., Yang S.N., Li K.N. The research progress of the *in situ* metal matrix composites. *Key Eng. Mater.* 2013. Vol. 575–576. P. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.575-576.137.
- David Raja Selvam J., Dinaharan I., Vibin Philip S., Mashinini P.M. Microstructure and mechanical characterization of *in situ* synthesized AA6061/(TiB₂ + Al₂O₃) hybrid aluminum matrix composites. J. Alloys Compd. 2018. Vol. 740. P. 529–535. DOI: 10.1016/j.jallcom. 2018.01.016.
- Panfilov A., Prusov E. Current state and trends of development of aluminum matrix composite alloys. In: Proceedings of 22nd International Conference on Metallurgy and Materials. (METAL 2013). 2013. P. 1195–1199.

- Pramod S.L., Bakshi S.R., Murty B.S. Aluminum-based cast in situ composites: A review. J. Mater. Eng. Perform. 2015. Vol. 24. P. 2185–2207. DOI: 10.1007/s11665-015-1424-2.
- Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. *Russ. Metall. (Met.).* 2011. No. 7. P. 670–674. DOI: 10.1134/S0036029511070123.
- Deev V.B., Prusov E.S., Kutsenko A.I. Theoretical and experimental evaluation of the effectiveness of aluminum melt treatment by physical methods. *Metall. Ital.* 2018. No. 2. P. 16–24.
- Селянин И.Ф., Деев В.Б., Белов Н.А., Приходько О.Г., Пономарева К.В. Физические модифицирующие воздействия и их влияние на кристаллизацию литейных сплавов. Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. No. 3. C. 56—59.

Selyanin I.F., Deev V.B., Belov N.A., Prikhodko O.G., Ponomareva K.V. Physical modifying effects and their influence on the crystallization of casting alloys. *Russ.* J. Non-Ferr. Met. 2015. Vol. 56. No. 4. P. 434–436. DOI: 10.3103/S1067821215040197.

- Deev V.B., Selyanin I.F., Kutsenko A.I., Belov N.A., Ponomareva K.V. Promising resource saving technology for processing melts during production of cast aluminum alloys. *Metallurgist.* 2015. Vol. 58. P. 1123–1127. DOI: 10.1007/s11015-015-0050-4.
- Deev V., Prusov E., Rakhuba E. Physical methods of melt processing at production of aluminum alloys and composites: Opportunities and prospects of application. *Mater. Sci. Forum.* 2019. Vol. 946. P. 655–660. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.655.
- Babu N.H., Fan Z., Eskin D.G. Application of external fields to technology of metal-matrix composite materials. TMS 2013 Annual Meeting. Henry B. Gonzalez Convention Center (San Antonio, Texas. 3–7 March 2013). TMS/Wiley. P. 1037–1044.
- Djan E., Madam S.V., Babu N.H., Tamayo-Ariztondo J., Eskin D.G., Fan Z. Processing of Metal matrix composites under external fields and their application as grain refiner (Ed. Grandfield J.). Light Metals. 2014. P. 1401–1404.
- Базин Ю.А., Курбатов В.Н., Баум Б.А. Рентгенографические исследования структуры ближнего порядка жидкого свинца. *Расплавы.* 1999. No. 1. С. 75-80. *Bazin Yu.A., Kurbatov V.N., Baum B.A.* X-ray diffraction study of short-range structure in liquid lead. *Rasplavy.* 1999. Vol. 1. P. 14-17.
- Amati M., Balijepalli S.K., Mezzi A., Kaciulis S., Montanari R., Varone A. Temperature dependent phenomena in liquid LBE alloy. Mater. Sci. Forum. 2017. Vol. 884. P. 41– 52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.884.41.

- Popel' P.S., Sidorov V.E., Calvo-Dahlborg M., Dahlborg U., Molokanov V.V. Effect of heat treatment of a liquid alloy on its properties in the molten state and after amorphization. Russ. Metall. (Met.). 2021. No. 2. P. 88–101. DOI: 10.1134/S0036029521020208.
- Чикова О.А., Выохин В.В., Цепелев В.С. Влияние перегрева расплава на литую структуру сплавов Al—Sn. Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. No. 2. С. 40—48.

Chikova O.A., Vyukhin V.V., Tsepelev V.S. Influence of melt superheating treatment on the cast structure of Al—Sn alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. Vol. 62. No. 3. P. 286—292. DOI: 10.3103/S106782122103007X.

- Deev V.B., Prusov E.S., Vdovin K.N., Bazlova T.A., Temlyantsev M.V. Influence of melting unit type on the properties of middle-carbon cast steel. ARPN J. Eng. Appl. Sci. 2018. Vol. 13. P. 998–1001.
- Wang Q.L., Geng H.R., Zhuo M., Long F., Peng X. Effects of melt thermal rate treatment and modification of P and RE on hypereutectic Al—Si—Cu—Mg alloy. *Mater. Sci. Technol.* 2013. Vol. 29. P. 1233–1240. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000267.
- Wang Q., Geng H., Zhang S., Jiang H., Zuo M. Effects of melt thermal-rate treatment on Fe-containing phases in hypereutectic A1—Si alloy. *Metal. Mater. Trans. A.* 2014. Vol. 45. P. 1621–1630. DOI: 10.1007/s11661-013-2081-4.
- Wang Q., Zhang S., Zhang Z., Yan X., Geng H. Study of melt thermal-rate treatment and low-temperature pouring on Al–15%Si alloy. JOM. 2013. Vol. 65. No. 8. P. 958–966. DOI: 10.1007/s11837-013-0657-5.
- Deev V., Prusov E., Ri E., Prihodko O., Smetanyuk S., Chen X., Konovalov S. Effect of melt overheating on structure and mechanical properties of Al–Mg–Si cast alloy. *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 9. Art. 1353. DOI: 10.3390/met11091353.
- Chen H., Jie J., Fu Y., Ma H., Li T. Grain refinement of pure aluminum by direct current pulsed magnetic field and inoculation. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2014. Vol. 24. Iss. 5. P. 1295–1300. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63191-5.
- Zhang Y., Cheng X., Zhong H., Xu Z., Li L., Gong Y., Miao X., Song C., Zhai Q. Comparative study on the grain refinement of Al—Si alloy solidified under the impact of pulsed electric current and travelling magnetic field. *Metals.* 2016. Vol. 6. No. 7. Art. 170. DOI: 10.3390/met6070170.
- Тимошкин И.Ю., Никитин К.В., Никитин В.И., Деев В.Б. Влияние обработки расплавов электромагнитными акустическими полями на структуру и свойства сплавов системы Al—Si. Известия вузов. Цветная металлургия. 2016. No. 3. C. 28—33.

Timoshkin I.Yu., Nikitin K.V., Nikitin V.I., Deev V.B. Influence of treatment of melts by electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of alloys of the

Al—Si system. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. No. 5. P. 419–423. DOI: 10.3103/S1067821216050163.

- Arkulis M., Logunova O., Dolgushin D. Influence of magnetic field on formation of short range order regions in liquid metals: Fluctuation hypothesis. *Key Eng. Mater.* 2018. Vol. 777. P. 316–321. DOI: 10.4028/www.scientific. net/kem.777.316.
- Deev V., Ri E., Prusov E. Mechanism of influence of nanosecond electromagnetic pulses on crystallization behavior of aluminum alloys. In: Proceedings of 27-th International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: Tanger Ltd., 2018. P. 1363–1369.
- Zhang Y., Rabiger D., Willers B., Eckert S. The effect of pulsed electrical currents on the formation of macrosegregation in solidifying A1–Si hypoeutectic phases. *Int. J. Cast Metal. Res.* 2016. Vol. 30. P. 13–19. DOI: 10.1080/13640461.2016.1174455.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Stolboushkina O.A., Konovalov S.V. Dislocation substructure evolution on Al creep under the action of the weak electric potential. *Mater. Sci. Eng. A.* 2010. Vol. 527. Iss. 3. P. 858–861. DOI: 10.1016/j. msea.2009.10.045.
- Zuev L.B., Danilov V.I., Konovalov S.V., Filip'Ev R.A., Gromov V.E. Influence of contact potential difference and electric potential on the microhardness of metals. *Phys. Solid State.* 2009. Vol. 51. Iss. 6. P. 1137–1141. DOI: 10.1134/S1063783409060092.
- Wang X.J., Luo X.X., Cong F.G., Cui J.Z. Research progress of microstructure control for aluminium solidification process. Chin. Sci. Bull. 2013. Vol. 58. No. 4-5. P. 468– 473. DOI: 10.1007/s11434-012-5585-1.
- Zhao Z., Liu Y., Liu L. Grain refinement induced by a pulsed magnetic field and synchronous solidification. *Mater. Manuf. Process.* 2011. Vol. 26. Iss. 9. P. 1202–1206. DOI: 10.1080/10426914.2011.564251.
- Deev V, Ri E., Prusov E., Ermakov M., Slavinskaya N. Structure formation of cast Al—Mg—Si alloys during the melts irradiation with nanosecond electromagnetic pulses. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 1001. Art. 012054. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012054.
- Kaldre I., Bojarevičs A. Electromagnetic contactless method for metal matrix composite production. *Magnetohydrodynamics*. 2020. Vol. 56. No. 2-3. P. 325–331. DOI: 10.22364/mhd.56.2-3.24.
- Zhang L., Li W., Yao J.P., Qiu H. Effects of pulsed magnetic field on microstructures and morphology of the primary phase in semisolid A356 Al slurry. *Mater. Lett.* 2012. Vol. 66. Iss. 1. P. 190–192. DOI: 10.1016/j.matlet. 2011.08.001.
- 48. *Bai Q.-W., Ma Y.-L., Xing S.-Q., Feng Y.-F., Bao X.-Y., Yu W.-X.* Refining of a DC-casting aluminum alloy struc-

ture using surface electromagnetic pulsing. *Gongcheng Kexue Xuebao/Chin. J. Eng.* 2017. Vol. 39. Iss. 12. P. 1828—1834. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.008.

- Liotti E., Lui A., Vincent R., Kumar S., Guo Z., Connolley T., Dolbnya I.P., Hart M., Arnberg L., Mathiesen R.H., Grant P.S. A synchrotron X-ray radiography study of dendrite fragmentation induced by a pulsed electromagnetic field in an Al—15Cu alloy. *Acta Mater.* 2014. Vol. 70. P. 228—239. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.02.024.
- Bai Q., Wang J., Xing S., Ma Y., Bao X. Crystal orientation and crystal structure of paramagnetic α-Al under a pulsed electromagnetic field. *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Art. 10603. DOI: 10.1038/s41598-020-67352-4.
- Gong Y.-Y., Luo J., Jing J.-X., Xia Z.-Q., Zhai Q.-J. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation. *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 497. Iss. 1-2. P. 147– 152. DOI: 10.1016/j.msea.2008.06.027.
- Zi B.-T., Ba Q.-X., Cui J.-Z., Bai Y.-G., Na X.-J. Effect of strong pulsed electromagnetic field on metal's solidified structure. Wuli Xuebao/Acta Phys. Sin. 2000. Vol. 49. Iss. 5. P. 1013–1014.
- Ban C.Y., Cui J.Z., Ba Q.X., Lu G.M., Zhang B.J. Influence of pulsed magnetic field on microstructure and macro-segregation in 2024 Al-alloy. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2002. Vol. 15. No. 4. P. 380–384.
- 54. Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Деев В.Б., Егорова Л.Г., Нефедьев А.А., Прусов Е.С. Влияние магнитного поля на структурообразование при кристаллизации и физико-механические свойства алюминиевых сплавов. Известия вузов. Цветная металлургия. 2019. No. 2. C. 51—57.
 - Vdovin K.N., Dubsky G.A., Deev V.B., Egorova L.G., Nefediev A.A., Prusov E.S. Influence of a magnetic field on structure formation during the crystallization and physicomechanical properties of aluminum alloys. Russ. J. Non-Ferr. Met. 2019. Vol. 60. No. 3. P. 247–252. DOI: 10.3103/S1067821219030155.
- Zhang L., Zhan W., Jin F., Zhou Q. Microstructure and properties of A357 aluminium alloy treated by pulsed magnetic field. *Mater. Sci. Technol.* 2018. Vol. 34. Iss. 6. P. 698–702. DOI: 10.1080/02670836.2017.1410925.
- Eskin D.G. Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook. *Mater.* Sci. Technol. 2017. Vol. 33. Iss. 6. P. 636–645. DOI: 10.1080/02670836.2016.1162415.
- Sardar S., Karmakar S.K., Das D. Ultrasonic cavitation based processing of metal matrix nanocomposites: An overview. Adv. Mat. Res. 2014. Vol. 1042. P. 58–64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1042.58.
- 58. *Liu Z., Xie M., Liu X.M.* Microstructure and properties of *in situ* Al–Si–Mg₂Si composite prepared by melt

superheating. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 52. P. 750–754. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.750.

- Wang F., Eskin D., Mi J., Connolley T., Lindsay J., Mounib M. A refining mechanism of primary Al₃Ti intermetallic particles by ultrasonic treatment in the liquid state. *Acta Mater.* 2016. Vol. 116. P. 354–363. DOI: 10.1016/j. actamat.2016.06.056.
- Wang H.M., Zhao B., He Y.Q., Zhao Y.N., Li G.R., Zhang Z. Effect of electromagnetic stirring on microstructure of *in situ* synthesized (Al₂O₃ + Al₃Zr)P/Al composites. Adv. Mat. Res. 2011. Vol. 284-286. P. 94–97. DOI: 10.4028/ www.scientific.net/amr.284-286.94.
- Vorozhtsov S., Kudryashova O., Promakhov V., Dammer V., Vorozhtsov A. Theoretical and experimental investigations of the process of vibration treatment of liquid metals containing nanoparticles. JOM. 2016. Vol. 68. P. 3094—3100. DOI: 10.1007/s11837-016-2147-z.
- 62. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Роль порошковых прекурсоров при получении композиционных сплавов жидкофазными методами. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. No. 2. C. 47—58.

Prusov E.S., Panfilov A.A., Kechin V.A. Role of powder precursors in production of composite alloys using liquid-phase methods. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. P. 308–316. DOI: 10.3103/S1067821217030154.

- Malaki M., Fadaei Tehrani A., Niroumand B., Gupta M. Wettability in metal matrix composites. *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 7. Art. 1034. DOI: 10.3390/met11071034.
- Cong X., Shen P., Wang Y., Jiang Q. Wetting of polycrystalline SiC by molten Al and Al—Si alloys. *Appl. Surf. Sci.* 2014. 317. P. 140–146. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.08.055.
- Carotenuto G., Gallo A., Nicolais L. Degradation of SiC particles in aluminium-based composites. J. Mater. Sci. 1994. Vol. 29. P. 4967–4974.
- 66. Nordin N.A., Abubakar T.A., Hamzah E., Farahany S., Ourdjini A. Effect of superheating melt treatment on Mg₂Si particulate reinforced in Al-Mg₂Si-Cu in situ composite. Procedia Eng. 2017. Vol. 184. P. 595-603. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.144.
- Qin Q.D., Zhao Y.G., Liang Y.H., Zhou W. Effects of melt superheating treatment on microstructure of Mg₂Si/ Al-Si-Cu composite. J. Alloys Compd. 2005. Vol. 399. Iss. 1-2. P. 106-109. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.03.015.
- Li Y., Shang H., Ma B., Guo X., Li R., Li G. The effect of temperature and sputtered particles on the wettability of Al/Al₂O₃. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 9. Art. 2110. DOI: 10.3390/ma14092110.
- Lamouri S., Hamidouche M., Bouaouadja N., Belhouchet H., Garnier V., Fantozzi G., Trelkat J.F. Control of the γ-alumina to α-alumina phase transformation for an optimized

alumina densification. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 2017. Vol. 56. Iss. 2. P. 47–54. DOI: 10.1016/j.bsecv.2016.10.001.

- Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-particles: A Review. *Metals.* 2014. Vol. 4. No. 1. P. 65–83. DOI: 10.3390/met4010065.
- Liotti E., Lui A., Vincent R., Kumar S., Guo Z., Connolley T., Dolbnya I.P., Hart M., Arnberg L., Mathiesen R.H., Grant P.S. A synchrotron X-ray radiography study of dendrite fragmentation induced by a pulsed electromagnetic field in an Al—15Cu alloy. Acta Mater. 2014. Vol. 70. P. 228—239. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.02.024.
- Agrawal S., Ghose A.K., Chakrabarty I. Effect of rotary electromagnetic stirring during solidification of *in situ* Al-TiB₂ composites. *Mater. Design.* 2017. Vol. 113. P. 195–206. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.10.007.
- Watson I.G., Forster M.F., Lee P.D., Dashwood R.J., Hamilton R.W., Chirazi A. Investigation of the clustering behaviour of titanium diboride particles in aluminium. Compos. Pt. A. Appl. Sci. Manuf. 2005. Vol. 36. Iss. 9. P. 1177–1187. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.02.003.
- Youssef Y.M., Dashwood R.J., Lee P.D. Effect of clustering on particle pushing and solidification behaviour in TiB₂ reinforced aluminium PMMCs. Compos. Pt. A. Appl. Sci. Manuf. 2005. Vol. 36. Iss. 6. P. 747–763. DOI: 10.1016/j. compositesa.2004.10.027.
- Han Y.F., Shu D., Jin L., Wang J., Sun B.D. Microstructure and grain refining performance of a rapidly solidified A1–5Ti–1B master alloy. *Mater. Sci. Forum.* 2007. Vol. 546-549. P. 755–760. DOI: 10.4028/www.scientific. net/msf.546-549.755.
- Zhong L.-H., Zhao Y.-T., Zhang S.-L., Chen G., Chen S., Liu Y.-H. Microstructure and mechanical properties of in situ TiB₂/7055 composites synthesized by direct magnetochemistry melt reaction. Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2013. Vol. 23. Iss. 9. P. 2502–2508. DOI: 10.1016/ S1003-6326(13)62761-2.
- Zhao Y.-T., Zhang S.-L., Chen G. Aluminum matrix composites reinforced by *in situ* Al₂O₃ and Al₃Zr particles fabricated via magnetochemistry reaction. *Trans. Non-ferr. Met. Soc. China.* 2010. Vol. 20. Iss. 11. P. 2129–2133. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60429-5.
- Du Y.-H., Zhang P., Zhang W.-Y., Wang Y.-J. Distribution of SiC particles in semisolid electromagnetic-mechanical stir-casting Al—SiC composite. *China Foundry*. 2018. Vol. 15. P. 351—357. DOI: 10.1007/s41230-018-8086-2.
- Zhang P., Zhang W., Du Y., Wang Y. High-performance Al-1.5wt.%Si-Al₂O₃ composite by vortex-free highspeed stir casting. J. Manuf. Process. 2020. Vol. 56. P. 1126-1135. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.016.
- 80. *Eskin G.I., Eskin D.G.* Ultrasonic melt treatment of light alloy melts. 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2014.

- Eskin G.I. Improvement of the structure and properties of ingots and worked aluminum alloy semifinished products by melt ultrasonic treatment in a cavitation regime. *Metallurgist.* 2010. Vol. 54. Iss. 7-8. P. 505–513. DOI: 10.1007/s11015-010-9331-0.
- Huang K., Jiang R., Li X., Zhang L., Li Z., Li R. Effects of high-intensity ultrasound on microstructure and mechanical property of *in situ* TiB₂/2A1₄ composites. *Metals.* 2019. Vol. 9. Art. 1210. DOI: 10.3390/met9111210.
- Chen D., Zhao Y., Li G., Zheng M., Chen G. Mechanism and kinetic model of *in situ* TiB₂/7055Al nanocomposites synthesized under high intensity ultrasonic field. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci.* 2011. Vol. 26. Iss. 5. P. 920–925. DOI: 10.1007/s11595-011-0337-7.
- Choi H., Jones M., Konishi H., Li X. Effect of combined addition of Cu and aluminum oxide nanoparticles on mechanical properties and micro-structure of Al– 7Si–0.3Mg alloy. *Metall. Mater. Trans. A.* 2012. Vol. 43. P. 738–746. DOI: 10.1007/s11661-011-0905-7.
- Christy Roshini P., Nagasivamuni B., Raj B., Ravi K.R. Ultrasonic-assisted synthesis of graphite-reinforced Al matrix nanocomposites. J. Mater. Eng. Perform. 2015. Vol. 24. P. 2234–2239. DOI: 10.1007/s11665-015-1491-4.
- Su H., Gao W., Feng Z., Lu Z. Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al₂O₃ particle reinforced aluminum matrix composites. *Mater. Des.* 2012. Vol. 36. P. 590—596. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.11.064.
- Padhi P., Dash B. N., Mohanty P., Satapathy B. K., Kar S. Synthesis of bulk metal matrix nanocomposites by full cavitation solidification method. *Key Eng. Mater.* 2013. Vol. 545. P. 193–196. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ KEM.545.193.
- Nampoothiri J., Raj B., Ravi K.R. Effect of ultrasonic treatment on microstructure and mechanical property of *in situ* A1/2TiB₂ particulate composites. *Mater. Sci. Forum.* 2015. Vol. 830-831. P. 463–466. DOI: 10.4028/ www.scientific.net/MSF.830-831.463.
- Mirihanage W., Xu W., Tamayo-Ariztondo J., Eskin D., Garcia-Fernandez M., Srirangam P., Lee P. Synchrotron radiographic studies of ultrasonic melt processing of metal matrix nano composites. *Mater. Lett.* 2016. Vol. 164. P. 484–487. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.11.022.
- Afkhami M., Hassanpour A., Fairweather M., Njobuenwu D.O. Reynolds number effects on particle agglomeration in turbulent channel flow. Comput. Aided Chem. Eng. 2014. Vol. 33. P. 967–972. DOI: 10.1016/B978-0-444-63456-6.50162-9.
- Liu X., Jia S., Nastac L. Ultrasonic cavitation-assisted molten metal processing of cast A356-nanocomposites. *Int. J. Metalcast.* 2014. Vol. 8. P. 51–58. DOI: 10.1007/ BF03355591.

- 92. Jia S., Allison P.G., Rushing T.W., Nastac L. Ultrasonic processing of 6061-based nanocomposites for high performance applications. In: Advances in the science and engineering of casting solidification (Eds. Nastac L. et al.). Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-48117-3_5.
- 93. Gao Q., Wu S., Lu S., Xiong X., Du R., An P. Improvement of particles distribution of *in situ* 5 vol.% TiB₂ particulates reinforced Al—4.5Cu alloy matrix composites with ultrasonic vibration treatment. J. Alloys Compd. 2017. Vol. 692. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.013.
- 94. Paul T., Zhang C., Boesl B., Agarwal A. Correlations to predict microstructure and mechanical properties of ultrasonically cast metal matrix nanocomposites as a function of treatment time. Adv. Eng. Mater. 2020. Vol. 22. Iss. 10. Art. 2000413. DOI: 10.1002/adem.202000413.
- 95. Yuan D., Hu K., Lü S., Wu S., Gao Q. Preparation and properties of nano-SiCp/A356 composites synthesised with a new process. *Mater. Sci. Technol.* 2018. Vol. 34. Iss. 12. P. 1415–1424. DOI: 10.1080/02670836.2018. 1458479.
- 96. Poovazhagan L., Kalaichelvan K., Balaji V.R., Ganesh P., Kali Avudaiappan A. Development of AA6061/SiCp metal matrix composites by conventional stir casting and ultrasonic assisted casting routes: A comparative study. Adv. Mat. Res. 2014. Vol. 984-985. P. 384–389. DOI: 10.4028/ www.scientific.net/AMR.984-985.384.
- Sillekens W.H., Jarvis D. J., Vorozhtsov A., Bojarevics V., Badini C.F., Pavese M., Terzi S., Salvo L., Katsarou L., Dieringa H. The ExoMet Project: EU/ESA Research on high-performance light-metal alloys and nanocomposites. Metall. Mater. Trans. A. 2014. Vol. 45A. P. 3349– 3361. DOI: 10.1007/s11661-014-2321-2.
- Mounib M., Pavese M., Badini C., Lefebvre W., Dieringa H. Reactivity and microstructure of Al₂O₃-reinforced magnesium matrix composites. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014. No. 476079. P. 1-6. DOI: 10.1155/2014/476079.
- Daudin R., Terzi S., Lhuissier P., Salvo L., Boller E. Remelting and solidification of a 6082 Al alloy containing submicron yttria particles: 4D experimental study by *in situ X*-ray microtomography. *Mater. Des.* 2015. Vol. 87. P. 313–317. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.141.
- 100. Zhang W.-Q., Lou C.-S. Numerical model and experimental observation for distribution of SiCp in electromagnetic-centrifugally cast composites. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2010. Vol. 20. Iss. 5. P. 870–876. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60228-4.
- 101. Wang G., Wang Q., Easton M.A., Dargusch M.S., Qian M., Eskin D.G., StJohn D.H. Role of ultrasonic treatment, inoculation and solute in the grain refinement of commercial purity aluminium. Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Art. 9729. DOI: 10.1038/s41598-017-10354-6.