

УДК 539.5; 539.8; 669
DOI 10.17223/19988621/55/8

**П.А. Данилов, А.П. Хрусталеv, А.Б. Ворожцов, И.А. Жуков,
В.В. Промахов, М.Г. Хмелева, Е.В. Пикушак, А.В. Кветгинская**

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ¹

Проведен анализ современных методов внешних физических воздействий на алюминиевые сплавы в процессе литья и добавления в них упрочняющих элементов: механического перемешивания, воздействия электромагнитными полями, обработку ультразвуком, вибрации. Выделены преимущества и ограничения этих методов. Обсуждаются процессы, происходящие во время применения воздействий, их конечное влияние на эксплуатационные свойства получаемых сплавов. Приведены схемы технологических установок, с помощью которых реализуются воздействия, и собственный опыт обработки легких сплавов внешними физическими полями.

Ключевые слова: *легкие сплавы, механическое перемешивание, электромагнитная обработка, ультразвук, вибрация.*

В современном машиностроении динамично возрастает спрос на легкие сплавы на основе алюминия. Эти сплавы позволяют решать технологическую задачу повышения эксплуатационных свойств изделий машиностроительных производств, одновременно снижая их массу. Одновременно с изучением и развитием методов упрочнения легких сплавов требуют совершенствования и литейные технологии, поскольку традиционные технологии литья не позволяют повышать свойства сплава при введении в жидкую фазу основного металла твердой фазы упрочняющих частиц [1].

Современные способы обработки легких сплавов во время литья делают возможным повысить физические, а в конечном счете, и эксплуатационные свойства получаемых сплавов [2, 3] путем дегазации, снижения среднего размера зерна, повышения однородности состава сплава, снижения количества агломераций и примесей на границах зерен, улучшения смачиваемости и т.д.

На базе лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов НИ ТГУ для решения этих задач используются и развиваются такие способы обработки сплавов внешними физическими полями во время литья и последующей кристаллизации, как механическое перемешивание, воздействие на расплав электромагнитными полями, обработка расплава ультразвуком, а также вибрация [4–7].

Механическое перемешивание

С помощью механического перемешивания повышается равномерность распределения легирующего вещества в матрице основного металла сплава. Данный способ обработки легко реализуем технологически. И при его применении не требуется подвергать расплав дополнительному нагреву и обработке расплава во время кристаллизации. Чем выше интенсивность перемешивания твердой фазы

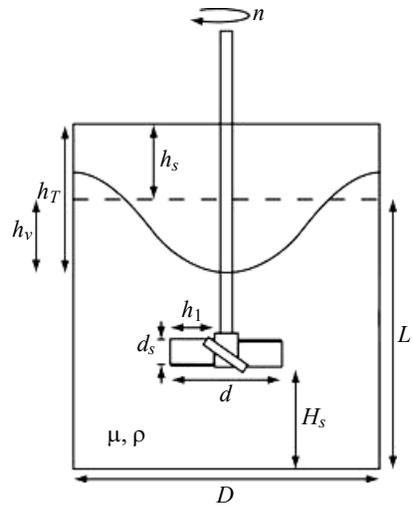
¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).

упрочняющего вещества в жидкой фазе основного металла, тем выше дисперсность армирующей фазы. Также высокая интенсивность перемешивания способствует равномерности распределения армирующего вещества по объему расплава.

В [8] описана схема установки для механического перемешивания алюминиевых расплавов (рис. 1).

Рис. 1. Схема установки для механического перемешивания алюминиевых расплавов (D – диаметр тигля, d – диаметр крыльчатки, H_s – расстояние между крыльчаткой и дном тигля, L – статическая высота жидкого металла, h_1 – ширина лезвия, d_s – высота лезвия)

Fig. 1. Installation diagram for mechanical mixing of aluminum melts (D is the crucible diameter; d is the impeller diameter; H_s is the distance between impeller and crucible bottom; L is the static height of a liquid metal; h_1 is the blade width; and d_s is the blade height)



Также в данной работе приведена схема лопастей винта в этой установке (рис. 2).

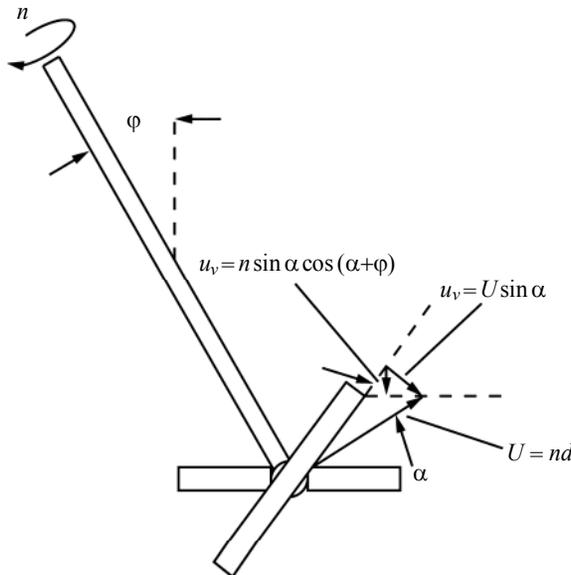


Рис. 2. Схема лопастей винта в конструкции установки для механического перемешивания алюминиевых расплавов: α – угол поворота, φ – угол наклона вала, n – скорость вращения

Fig. 2. Arrangement of propeller blades in an installation design for mechanical mixing of aluminum melts: α is the angle of rotation; φ is the angle of shaft tilt; and n is the rotation rate

Пример исследования алюминиевых сплавов, получаемых в результате литья с механическим перемешиванием, представлен в [9]. Результаты исследования показывают, что механическое перемешивание способствует дисперсности армирующей фазы и равномерности распределения армирующего вещества по объему расплава.

Значимые результаты в исследовании и новых оригинальных технологиях механического перемешивания легких сплавов, экспериментах по выбору оптимальных режимов механического перемешивания получили авторы настоящей работы [4].

С использованием разработанного оригинального устройства для механического замешивания порошковых материалов в расплав металла авторами были проведены эксперименты по введению частиц диборида титана в расплав алюминия АК7 [4]. На рис. 3 показана схема рабочего органа устройства.

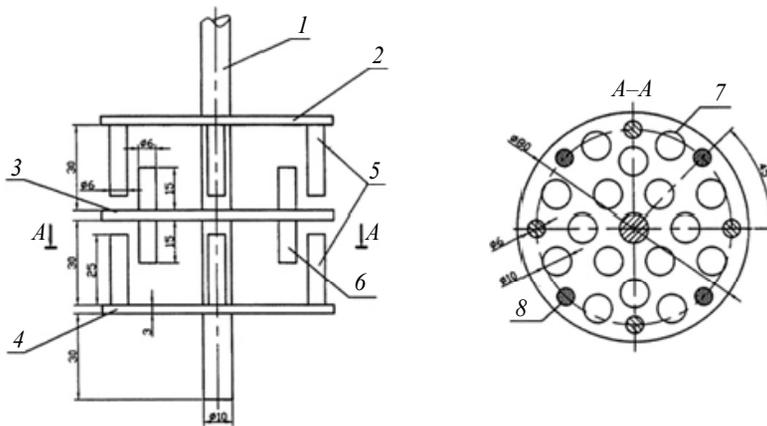


Рис. 3. Схема рабочего органа устройства для механического замешивания порошковых материалов в расплав металла

Fig. 3. Design of working element in a device for mechanical mixing of powdered materials into metal melt

Обнаружено, что использование механического завихрителя позволяет вводить в алюминиевый расплав тугоплавкие частицы диборида титана, что в свою очередь способствует получению отливок с мелкозернистой структурой и равномерно распределенными включениями частиц-упрочнителей (диборид титана). Установлено, что средней размер зерна в сплавах уменьшается с 900 мкм до 400 мкм при введении 0,2 мас.% диборида титана, при этом предел текучести увеличивается с 15 до 65 МПа, предел прочности с 140 до 220 МПа при сохранении исходной пластичности 4,5 %. На рис. 4 показана структура образца сплава, полученного без использования устройства (рис. 4, а) и с его использованием (рис. 4, б).

Изучена гидродинамика процесса перемешивания жидкого (расплавленного) металла в тигле под действием оригинального механического смесителя-завихрителя, выполненного в виде трех перфорированных дисков с размещенными на них штифтами. Получены оценки влияния скорости вращения завихрителя на картину течения жидкости в тигле. Показано, что увеличение скорости вращения завихрителя ведет к интенсивному росту турбулентной диффузии в жидком металле до

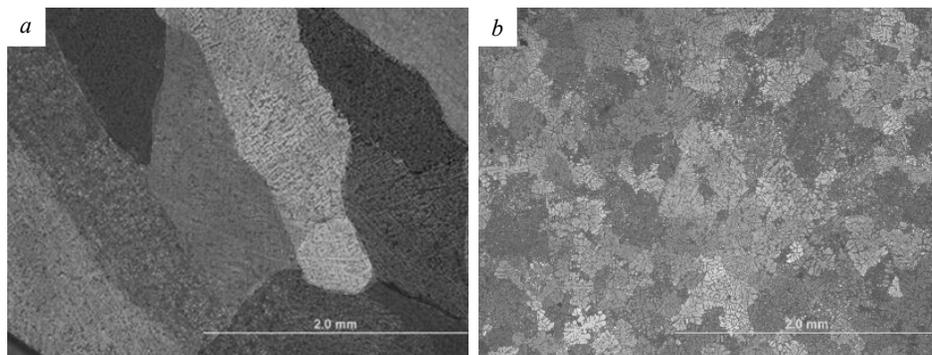


Рис. 4. Структура образца сплава, полученного:
a – без использования устройства; *b* – с использованием устройства

Fig. 4. Structure of the alloy pattern obtained:
(*a*) without the use of device and (*b*) with the use of device

тех пор, пока поверхность раздела металл – воздух не начнет взаимодействовать с нижним перфорированным диском завихрителя. Критерий мощности экспоненциально убывает с ростом числа Рейнольдса (скорости вращения завихрителя). Условия, при которых элементы завихрителя погружены полностью в жидкий металл, более благоприятны для формирования мелких вихрей, чем условия, при которых поверхность раздела жидкий металл – воздух взаимодействует с элементами завихрителя. Самые крупные вихри, сопоставимые по величине с размерами завихрителя, способны неравномерно перемешивать жидкий металл и внедренные в него микрочастицы, тогда как мелкие вихри, хотя и энергетически более слабые, могут обеспечить равномерное перемешивание, создавая участки равномерности в несколько десятков микрон.

Способ механического перемешивания имеет следующие недостатки:

- 1) снижение стойкости ротора и, как следствие, увеличение нагрузки на привод мешалки в ходе процесса деформации ротора;
- 2) образование окислов при контакте с атмосферой расплава на поверхности воронки при перемешивании.

Воздействие на расплав электромагнитными полями

Воздействие электромагнитными полями на расплавы во время добавления в них упрочняющих частиц позволяет снизить средний размер зерна, уменьшить концентрацию примесей на границах зерен, добиться равномерности и однородности структуры получаемого сплава, противостоять образованию столбчатой структуры. Одно из технологических решений воздействия на расплав электромагнитными полями – это электромагнитное перемешивание (ЭМП). Чтобы добиться максимальной однородности расплава и распределения по его структуре упрочняющего вещества, важно обеспечить нелинейное течение при перемешивании. Для этого можно при ЭМП воздействовать на расплав не одним, а сразу несколькими полями разного рода (пульсирующие и бегущие) [10] и с разным расположением по отношению к объему расплава. Важно обеспечить перемешивание всего объема и в обе стороны при изменении интенсивности и траектории полей.

Источник электромагнитного поля может располагаться как у прямолинейной части боковой стороны миксера, так и у угловой (рис. 5) [10].

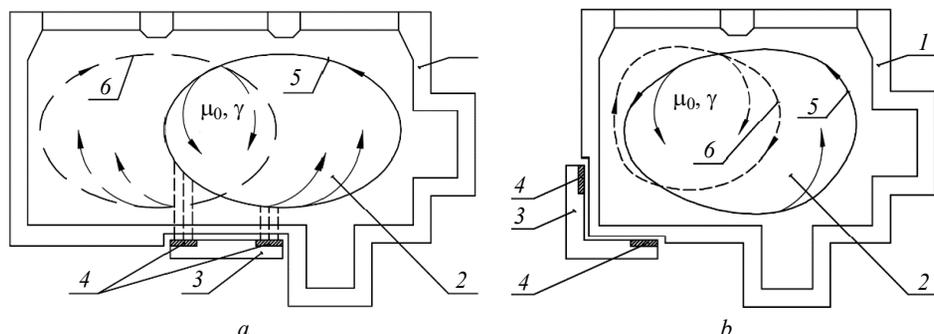


Рис. 5. Миксер с источником электромагнитного поля: а) источник электромагнитного поля у прямолинейной части боковой стороны миксера; б) источник электромагнитного поля у угловой части боковой стороны миксера. (1 – миксер, печь; 2 – расплав; 3 – источник бегущего электромагнитного поля; 4 – источники пульсирующих электромагнитных полей; 5 – траектории движения расплава под действием бегущего электромагнитного поля и пульсирующих полей разной интенсивности; 6 – траектории движения расплава при изменении направления бегущего поля)

Fig. 5. Stirrer with electromagnet ic field source located at: (a) rectilinear part of mixer's lateral side and (b) corner part of mixer's lateral side (1, stirrer and furnace; 2, melt; 3, the source of incoming electromagnetic field; 4, the sources of pulsating electromagnetic fields; 5, the trajectory of melt motion under the action of both incoming electromagnetic field and pulsating electromagnetic fields of various intensity; and 6, the trajectory of melt motion at the opposite direction of incoming field)

Под действием бегущего поля 3 расплав движется вдоль боковой стороны миксера в одну сторону. При изменении интенсивности разных пульсирующих полей 4 расплав начинает двигаться по траектории 5. При изменении направления бегущего поля, а также дальнейшем изменении интенсивности полей 4, расплав начинает двигаться по траектории 6. Таким образом, расплав перемешивается во всех частях миксера, печи.

Обычно процесс ЭМП занимает от 10 до 30 мин (это зависит от компонентов сплава и его объема) при силе тока в районе 200 А и при частоте используемого напряжения – от 0.1 до 2 Гц [11].

Первый этап ЭМП заключается в образовании связей между жидкой фазой основного сплава и твердой фазой легирующего вещества (на данном этапе важной задачей является подбор такого режима ЭМП, при котором растворение упрочняющего вещества в расплаве происходит быстро). И далее происходит распределение упрочняющих частиц в структуре и объеме расплава.

Авторами проведены эксперименты, показывающие, что электромагнитная обработка существенно влияет на структуру сплава. Так, за счет применения электромагнитной обработки средний размер зерна магниевого сплава МЛ5 снижен с 121 до 95 мкм (рис. 6) [7].

На рис. 7 показаны экспериментальные образцы сплава Al–4%Cu – до электромагнитной обработки и после нее. В результате электромагнитной обработки снижается средний размер зерна и характер кристаллизации.

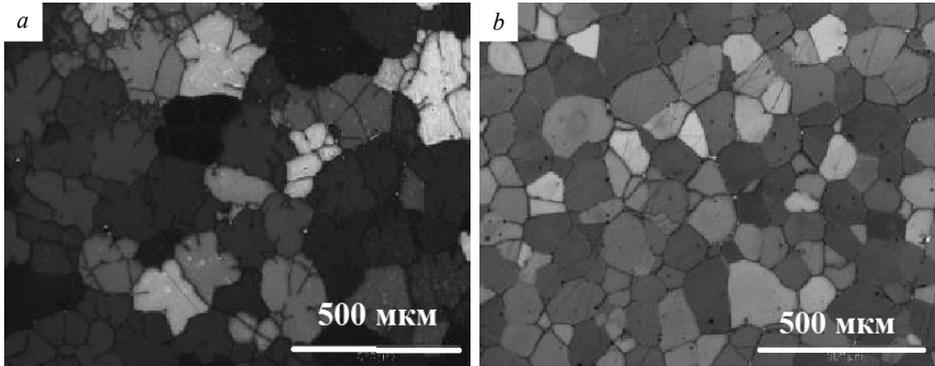


Рис. 6. Изображения структуры образцов сплава МЛ5: *a* – без обработки; *b* – после электромагнитной обработки
Fig. 6. Illustrations of the structure of ML5 alloy patterns: (a) before processing and (b) after electromagnetic processing

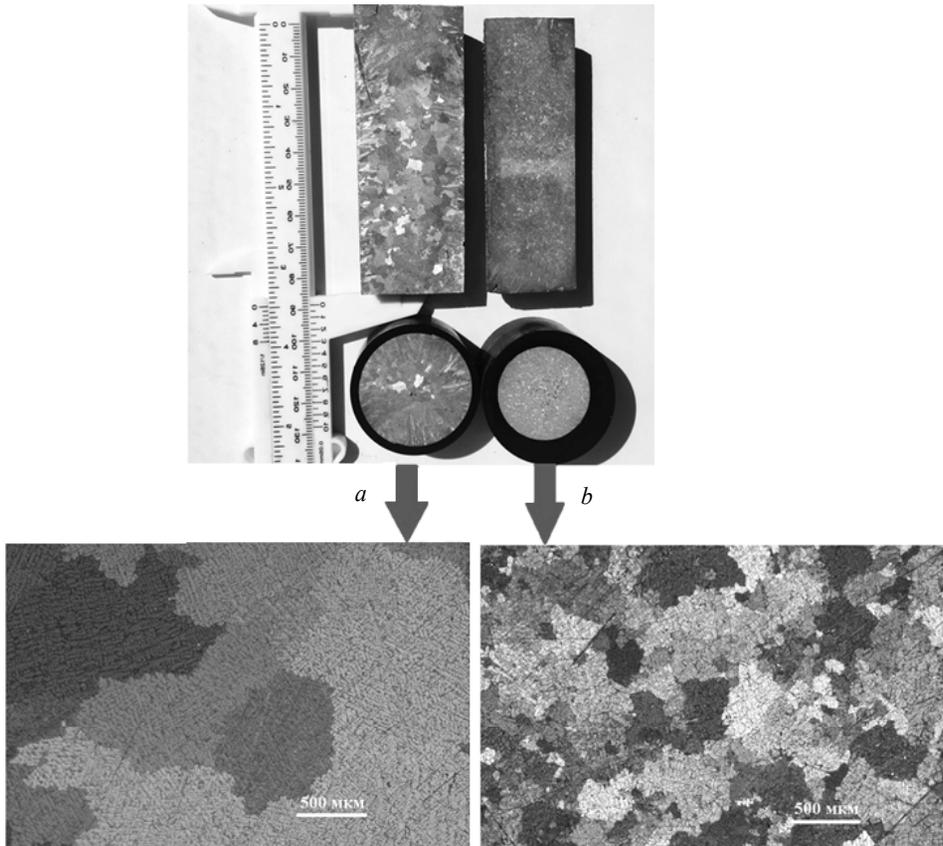


Рис. 7. Изображения структуры образцов сплава Al–4%Cu: *a* – без обработки; *b* – после электромагнитной обработки
Fig. 7. Illustrations of the structure of Al–4%Cu alloy patterns: (a) before processing and (b) after electromagnetic processing

Основным недостатком ЭМП является наличие мертвых зон перемешивания в миксере (в них эффективность перемешивания снижается). Также в случае применения ЭМП в больших печах за счет необходимости увеличения интенсивности бегущего поля снижаются эксплуатационные характеристики получаемого сплава и значительно повышается потребление электроэнергии установкой. Важным фактором, влияющим на свойства получаемого расплава, является режим воздействия электромагнитными полями. Интенсивность полей должна возрастать с увеличением концентрации упрочняющих частиц в расплаве [12].

Воздействие ультразвуком

Воздействие на легкие сплавы ультразвуковым излучением, так же, как и электромагнитными полями, является одним из наиболее эффективных и перспективным способом обработки расплавов. Данный метод позволяет обеспечить дегазацию, уменьшение среднего размера зерна в структуре сплава, повысить смачиваемость и деагломерацию частиц.

Для достижения требуемых параметров целевого сплава необходимо правильно подобрать параметры материалов и применения ультразвуковой обработки сплава: чистоту основного сплава, объем упрочняющих частиц, условия введения ультразвука в расплав, интенсивность ультразвука и т.д.

Типовая схема установки ультразвуковой обработки расплава показана на рис. 8.

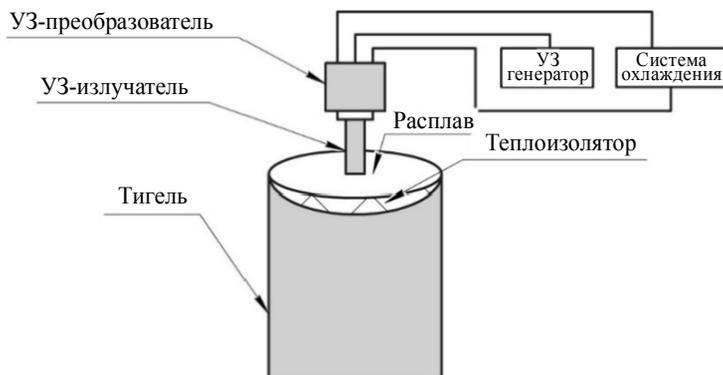


Рис. 8. Типовая схема установки ультразвуковой обработки расплава
Fig. 8. Diagram of typical installation for ultrasonic processing of melts

Ультразвуковая обработка – эффективный способ дегазации сплава.

Вода, содержащаяся в атмосфере, в процессе плавления алюминия образует на поверхности расплава водород и оксид алюминия. Этот водород распределяется по объему расплава, являясь основой пористости материала. Пористость, в свою очередь, приводит к снижению эксплуатационных свойств сплава: подверженности трещинам, снижению пластичности и т.д. Растворимость водорода в структуре материала зависит от ряда факторов:

- 1) условий на границе между атмосферой и жидкой фазой расплава;
- 2) влажности атмосферы и концентрации водорода в расплаве;
- 3) давления;
- 4) температуры.

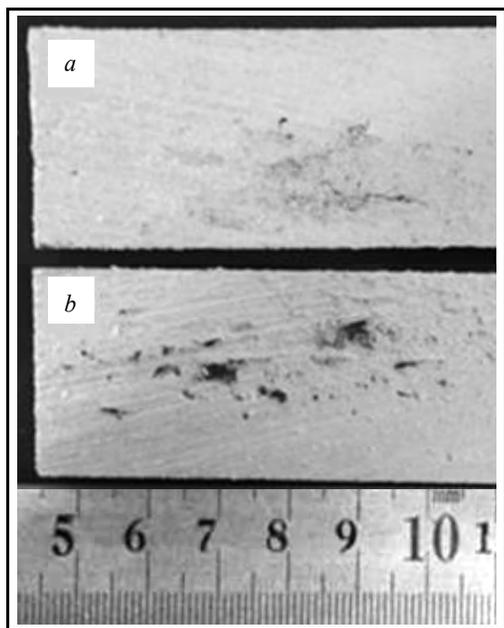
Преимуществом ультразвуковой дегазации перед вакуумной или продувкой газом является эффективное воздействие на водород внутри материала [2]. Снижению концентрации водорода в расплаве способствуют преобразования:

- 1) образование пузырьков водорода;
- 2) пульсация пузырьков в акустическом поле и рост диффузии водорода;
- 3) объединение мелких пузырьков в более крупные;
- 4) всплытие пузырьков на поверхность жидкой фазы расплава.

Факторы, влияющие на эффективность ультразвуковой дегазации:

- 1) параметры плавки материала, такие, как температура, поверхностное натяжение, растворимость водорода, вязкость и т.д.;
- 2) параметры ультразвуковой обработки, такие, как мощность, амплитуда, частота и т.д.;
- 3) текучесть расплава;
- 4) условия среды, такие, как давление, влажность и т.д.

Эксперименты, проведенные авторами [2, 5, 7, 13], показали, что воздействие ультразвуком на расплав – наиболее эффективно среди других видов воздействий для снижения размера зерна сплава. Если электромагнитное воздействие на сплав МЛ5 позволило снизить размер зерна со 121 до 95 мкм, то воздействие ультразвуком способствовало снижению среднего размера зерна до 80 мкм.



Влияние ультразвукового воздействия на уменьшение внутренних макродефектов показаны на рис. 9.

Рис. 9. Снимок макроструктуры литых образцов Al-4%Cu, полученных: *a* – с применением ультразвуковой обработки расплава; *b* – без применения ультразвуковой обработки расплава

Fig. 9. Picture of the macrostructure of Al-4%Cu alloy patterns obtained: (*a*) with ultrasonic processing and (*b*) without ultrasonic processing of melt

Воздействие ультразвука на расплав Al-4%Cu приводит к дегазации расплава, а дополнительное добавление частиц Al_2O_3 (0.1 %) способствует измельчению зерен (рис. 10).

Эксперимент по микроструктуре образцов Al-4%Cu с использованием оптического микроскопа показал, что ультразвуковая обработка расплава приводит к снижению среднего размера зерна и пористости (рис. 11). Особенно хорошо видны размеры зерен при наблюдении структуры слитка в поляризованном свете (рис. 12).

Результаты эксперимента по воздействию на сплав А356 ультразвуком с добавлением частиц ScF_3 показаны на рис. 13 [14].

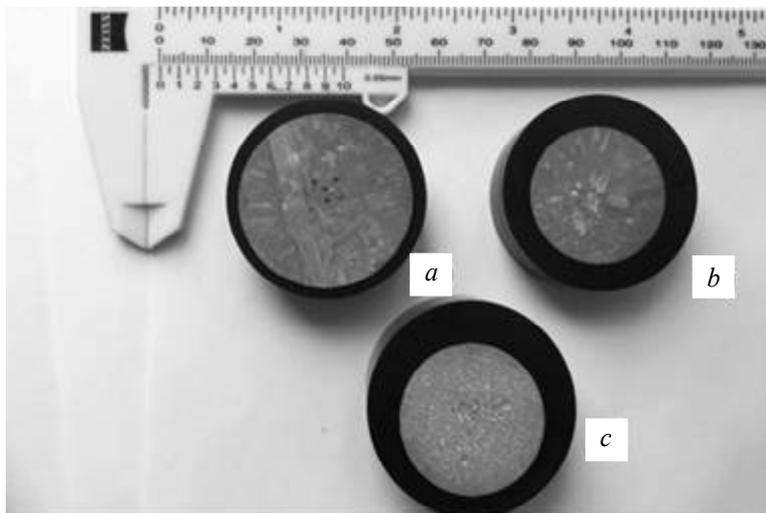


Рис. 10. Снимок макроструктуры образцов сплава Al-4%Cu: *a* – без ультразвуковой обработки; *b* – с применением ультразвуковой обработки; *c* – с применением ультразвуковой обработки с добавлением наночастиц Al_2O_3 (0.1%)

Fig. 10. Picture of the macrostructure of Al-4%Cu alloy patterns obtained: (*a*) without ultrasonic processing; (*b*) with ultrasonic processing; and (*c*) with both ultrasonic processing and addition of nanoparticles of Al_2O_3 (0.1%)

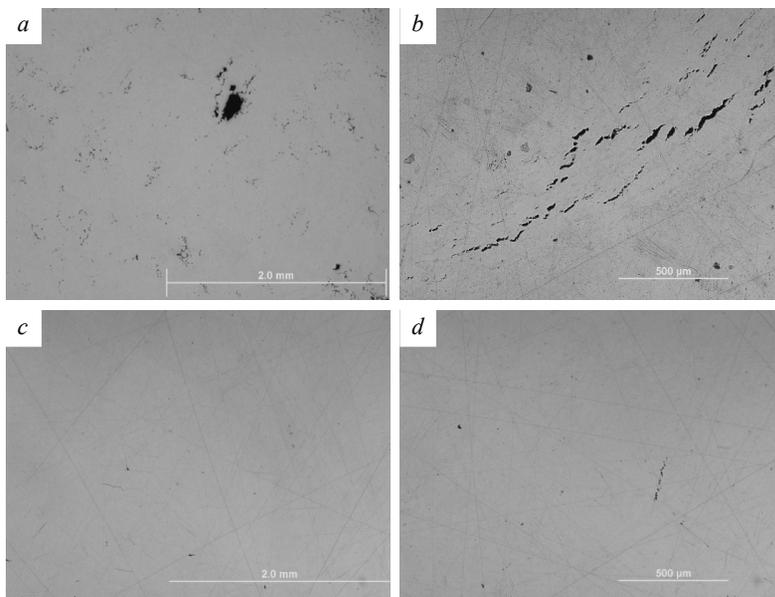


Рис. 11. Изображения структуры образцов сплава Al-4%Cu: *a*, *b* – без ультразвуковой обработки расплава; *c*, *d* – с применением ультразвуковой обработки расплава

Fig. 11. Illustrations of the structure of Al-4%Cu alloy patterns: (*a*), (*b*) without ultrasonic processing of melt and (*c*), (*d*) with ultrasonic processing of melt

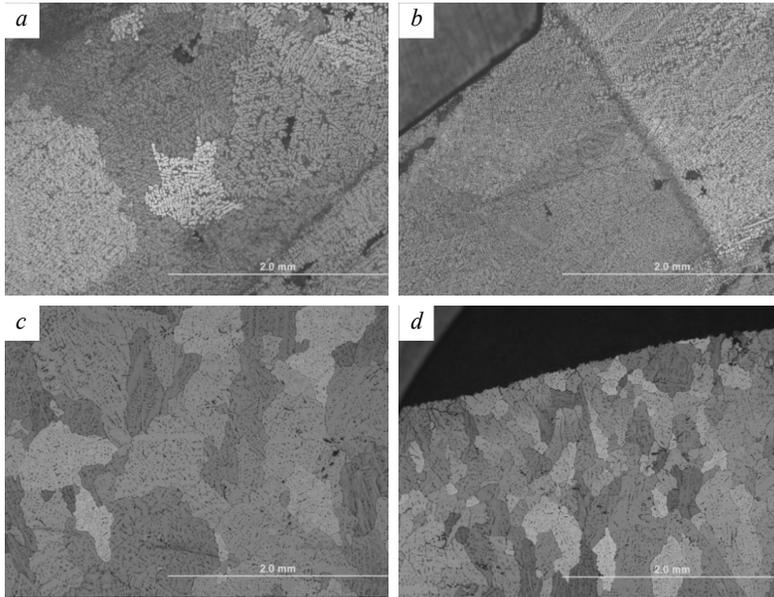


Рис. 12. Изображения структуры образцов сплава Al–4%Cu в поляризованном свете: *a, b* – без ультразвуковой обработки расплава; *c, d* – с применением ультразвуковой обработки расплава

Fig. 12. Illustrations of the structure of Al–4%Cu alloy patterns illuminated by polarized light: (*a*), (*b*) without ultrasonic processing and (*c*), (*d*) with ultrasonic processing of melt

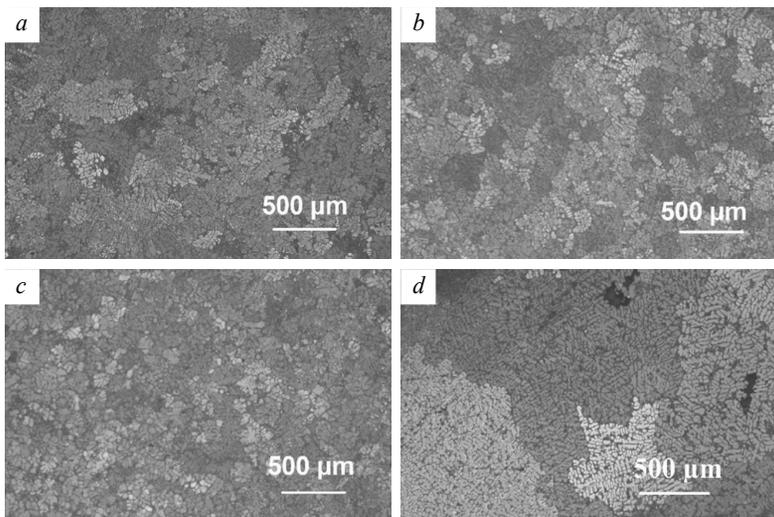


Рис. 13. Изображение микроструктуры сплава A356: *a* – после воздействия ультразвуком; *b* – после воздействия ультразвуком и добавления (0.2 вес.%) ScF₃; *c*) после воздействия ультразвуком и добавления (1 вес. %) ScF₃; *d*) без воздействия ультразвуком и без добавления ScF₃

Fig. 13. Illustration of microstructure of A356 aluminum alloy: (*a*) after ultrasonic treatment; (*b*) after ultrasonic treatment and addition of ScF₃ (0.2 wt.%); (*c*) after ultrasonic treatment and addition of ScF₃ (1 wt.%); and (*d*) without ultrasonic treatment and addition of ScF₃

Вибрация

Применение вибрации при литье легких сплавов с добавлением упрочняющих элементов позволяет добиться измельчения структуры сплава, равномерно распределить упрочняющие элементы в структуре расплава и, как следствие, повысить эксплуатационные свойства получаемого сплава, такие, как предел прочности, предел текучести и др.

Повышению эффекта от применения вибрации способствует одновременное применение механического перемешивания.

Принципиальная схема экспериментальной установки для обработки расплава вибрацией показана на рис. 14.

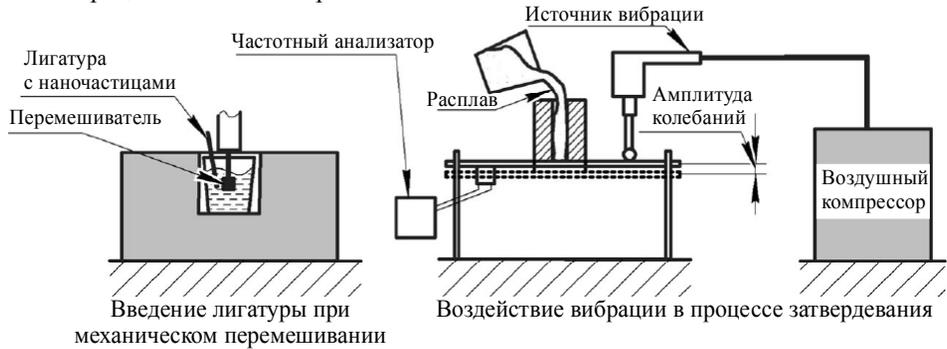


Рис. 14. Схема экспериментальной установки для обработки расплава вибрацией
Fig. 14. Diagram of experimental installation for vibro treatment of melts

Эксперимент, проведенный авторами, показал, что обработка сплава А356 вибрацией в режиме – частота 75 Гц, амплитуда 8 мм – повысила предел текучести с (48 ± 5) до (60 ± 5) МПа, а предел прочности на растяжение с (168 ± 7) до (185 ± 12) МПа [6]. При выборе режима вибрации частота, как правило, устанавливается от 10 до 100 Гц в зависимости от свойств обрабатываемых сплавов и режимов литья.

Оптимальные режимы вибрации (частота и амплитуда) для сплавов на основе разных металлов показаны на рис. 15.

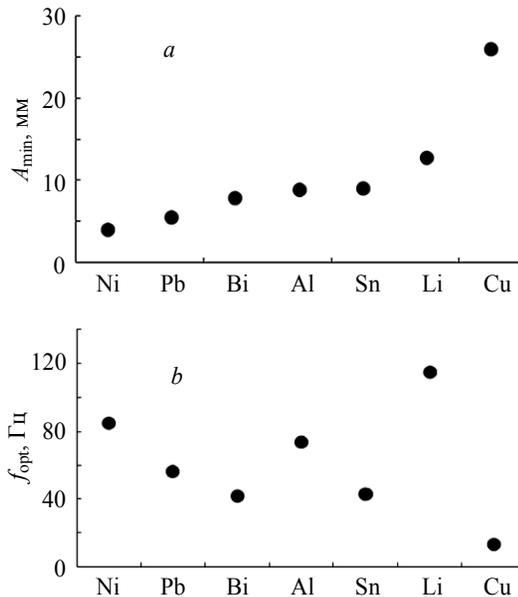


Рис. 15. Оптимальные режимы вибрации для сплавов на основе разных металлов: *a* – частота; *b* – амплитуда
Fig. 15. Optimal vibration modes for alloys based on different metals: (a) frequency and (b) magnitude

Комбинация различных способов воздействия

Помимо развития технологии и повышения эффективности каждого вида воздействия на легкие сплавы при литье в отдельности, важно исследовать возможность сочетания двух или более видов воздействия. Такие исследования активно ведутся на базе лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов НИ ТГУ.

С использованием комбинации различных методов внешнего воздействия (электростатическое поле, ультразвуковая обработка, вибрационная обработка) [4–6] авторами получены лёгкие сплавы на основе алюминиевого сплава АК7, упрочнённого наночастицами оксида алюминия. Установлено, что введение 0.2 вес.% наночастиц оксида алюминия способствует уменьшению пористости и среднего размера зерна (с 1000 до 300 мкм) сплава АК7 и увеличению механических свойств: предела текучести с 45 до 60 МПа, предела прочности с 175 до 210 МПа, пластичности с 3.5 до 4.5 %. Получены зависимости, связывающие время воздействия с физико-химическими свойствами частиц и расплава и с характеристиками акустического излучения. Установлено, что электростатический заряд поверхности частицы уменьшает краевой угол смачивания тем сильнее, чем меньше частица. Ультразвуковое воздействие делает возможным пропитку агломератов частиц расплавом металла и введения в расплав частиц благодаря создаваемому звукокапиллярному эффекту; время пропитки существенно зависит от значения краевого угла смачивания. Чем меньше краевой угол, тем меньше времени требуется для пропитки частицы с помощью ультразвука; при значении краевого угла смачивания меньше 90° пропитка частиц возможна даже без применения ультразвука, хотя ультразвуковое воздействие ускоряет этот процесс. Обнаружено, что величина критического заряда зависит от диаметра частиц, их диэлектрической проницаемости, поверхностного натяжения металла и краевого угла смачивания поверхности незаряженной частицы. Предложенные простые расчетные формулы позволяют оценить величину заряда и время ультразвукового воздействия, необходимого для успешного введения частиц в расплав металла [5].

Заключение

Таким образом, в работе показана эффективность применения различных методов внешнего воздействия (электромагнитное поле, ультразвуковая обработка, вибрационная обработка) на легкие сплавы. Продемонстрировано, что применение одновременно нескольких методов воздействия на расплав при литье при выборе верных режимов дает возможность реализовать для повышения эксплуатационных свойств сплава преимущества всех используемых методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Choi H., Jones M., Konishi H., Li X. Effect of combined addition of Cu and aluminum oxide nanoparticles on mechanical properties and microstructure of Al–7Si–0.3Mg alloy // *Metal. Mater. Trans.* 2012. V. 43A. P. 738–746. DOI: 10.1007/s11661-011-0905-7.
2. Puga H., Costa S., Barbosa J., et al. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy // *J. Mater. Proc. Technol.* 2011. No. 211. P. 1729–1735. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.012.
3. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., et al. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites // *Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci.* 2015. V. 46. No. 7. P. 2870–2875. DOI: 10.1007/s11661-015-2850-3.

4. Vorozhtsov S., Minkov L., Dammer V., et al. Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: Modeling and experiment // JOM. 2017. V. 69. No. 12. P. 2653–2657. DOI: 10.1007/s11837-017-2594-1.
5. Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalev A.P., Vorozhtsov S.A. Ultrasonic effect on the penetration of the metallic melt into submicron particles and their agglomerates // Russ. J. Non-Ferrous Metals. 2017. V. 58. No 4. P. 427–433. DOI: 10.3103/ S1067821217040101.
6. Vorozhtsov S.A., Kudryashova O.B., Promakhov V.V., et al. Theoretical and experimental investigations of the process of vibration treatment of liquid metals containing nanoparticles // JOM. 2016. V. 68. No 12. P. 3094–3100. DOI: 10.1007/s11837-016-2147-z.
7. Sillekens W.H., Jarvis D.J., Vorozhtsov A., et al. The ExoMet Project: EU/ESA research on high performance light metal alloys and nanocomposites // Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci.. 2014. V. 45. No 8. P. 3349–3361.
8. Grandfield J., Eskin D.G., Bainbridge I. Direct-Chill Casting of Light Alloys. John Wiley & Sons, 2013. 424 p.
9. García-Rodríguez S., Puentes J., Li X.C., Osswald T.A. Prediction of vortex height from mechanical mixing in metal matrix nanocomposite processing by means of dimensional analysis and scaling // J. Manufacturing Processes. 2014. No. 16. P. 212–217. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.12.001.
10. Патент № 2113672 РФ. Способ электромагнитного перемешивания электропроводных расплавов / Тимофеев В.Н., Христинич Р.М., Бояков С.А., Рыбаков С.А. Оpubл. 20.06.1998.
11. Павлов Е.А., Боговалов С.В., Тимофеев В.Н., Надточий Д.С. Магнитогидродинамическое перемешивание алюминиевых расплавов в миксерах сопротивления // Сибирский журнал науки и технологий. 2006. Т. 5. № 12. С. 201–205.
12. Robles Hernández F.C., Sokolowski J.H. Effects and on-line prediction of electromagnetic stirring on microstructure refinement of the 319 Al–Si hypoeutectic alloy // J. Alloys and Compounds. 2009. No. 480. P. 416–421. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.02.109.
13. Vorozhtsov S., Zhukov I., Vorozhtsov A., et al. Synthesis of micro- and nanoparticles of metal oxides and their application for reinforcement of Al-based alloys // Advances in Materials Science and Engineering. 2015. P. 6. DOI: 10.1155/2015/718207.
14. Vorozhtsov S., Zhukov I., Promakhov V., et al. The Influence of ScF₃ nanoparticles on the physical and mechanical properties of new metal matrix composites based on A356 aluminum alloy // JOM. 2016. V. 68. No. 12. P. 3101–3106. DOI: 10.1007/s11837-016-2141-5.

Статья поступила 27.04.2018 г.

Danilov P.A., Khrustalev A.P., Vorozhtsov A.B., Zhukov I.A., Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Pikushchak E.V., Kvetinskaya A.V. (2018) ANALYSIS OF THE EFFECT OF EXTERNAL PHYSICAL FIELDS ON THE CASTING OF LIGHT ALLOYS *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 55. pp. 84–98

DOI 10.17223/19988621/55/8

Keywords: light alloys, mechanical mixing, electromagnetic processing, ultrasound, vibration.

Advanced methods of external physical effects on the aluminum alloys during casting process and addition of reinforcing elements, which are used in the Research Laboratory of High-Energy and Special Materials in Tomsk State University, are analyzed. These methods are mechanical stirring, treatment by electromagnetic fields, vibration, and ultrasound. Application of external fields leads to an increase in the performance of obtained alloys by means of degassing, decreasing in the average grain size, increasing in the uniformity of alloy structure, decreasing in the quantity of agglomerations and impurities on the grain boundaries, improving wettability, etc. The changes observed in the structure of melt and the dependence of melt properties on the type and treatment mode of the external field, on the characteristics of initial metal as well as on the

characteristics and quantity of reinforcing particles added to the melt are shown. The results of several experiments demonstrating the effect of external fields on the aluminum alloys during casting process and the impact of reinforcing particles added to the melt are presented. The diagrams of technological installations whereby the external fields impact the melt are shown. The main parameters of operating conditions of installations are identified; for mechanical mixing they are the impeller rotation rate and the duration of mixing; for treatment by electromagnetic fields – the current intensity, the voltage frequency, and the exposure time; for ultrasound treatment – the capacity, the magnitude and the frequency of ultrasound, and the duration of application; for vibration – the frequency, the amplitude, and the duration of vibration.

DANILOV Pavel Alekseevich (Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: padanilov@gmail.com

KHRUSTALEV Anton Pavlovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tofik0014@mail.ru

VOROZHTSOV Aleksander Borisovich (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv1953@mail.ru

ZHUKOV Il'ya Aleksandrovich (Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

PROMAKHOV Vladimir Vasil'evich (Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vvpromakhov@mail.ru

KHMELEVA Marina Grigor'evna (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: khmelmg@gmail.com

PIKUSHCHAK Elizaveta Vladimirovna (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: liza@ftf.tsu.ru

KVETINSKAYA Alesya Vladimirovna (The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation). E-mail: ep.alessya.kvetinskaya@gmail.com

REFERENCES

1. Choi H., Jones M., Konishi H., Li X. (2012) Effect of combined addition of cu and aluminum oxide nanoparticles on mechanical properties and microstructure of Al–7Si–0.3Mg alloy. *Metall. Mater. Trans. A*. 43. pp. 738–746. DOI: 10.1007/s11661-011-0905-7.
2. Puga H., Costa S., Barbosa J., Ribeiro S., Prokic M. (2011) Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 211. pp. 1729–1735. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.012.
3. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J., Vorozhtsov A.B., Promakhov V.V., Averin A.A., Khrustalyov A.P. (2015) The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites. *Metall. Mater. Trans. A*. 46(7). pp. 2870–2875. DOI: 10.1007/s11661-015-2850-3.
4. Vorozhtsov S., Minkov L., Dammer V., Khrustalyov A., Zhukov I., Promakhov V., Vorozhtsov A., Khmeleva M. (2017) Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: modeling and experiment. *JOM*. 69(12). pp. 2653–2657. DOI: 10.1007/s11837-017-2594-1.
5. Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalev A.P., Vorozhtsov S.A. (2017) Ultrasonic effect on the penetration of the metallic melt into submicron particles and their agglomerates. *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 58(4). pp. 427–433. DOI: 10.3103/S1067821217040101.
6. Vorozhtsov S.A., Kudryashova O.B., Promakhov V.V., Dammer V., Vorozhtsov A.B. (2016) Theoretical and experimental investigations of the process of vibration treatment of liquid metals containing nanoparticles. *JOM*. 68(12). pp. 3094–3100. DOI: 10.1007/s11837-016-2147-z.

7. Sillekens W.H., Jarvis D.J., Vorozhtsov A., Bojarevics V., Badini C.F., Pavese M., Terzi S., Salvo L., Dieringa H., Katsarou L. (2014) The ExoMet Project: EU/ESA research on high-performance light metal alloys and nanocomposites. *Metall. Mater. Trans. A.* 45(8). pp. 3349–3361.
8. Grandfield J., Eskin D.G., Bainbridge I. (2013) *Direct-Chill Casting of Light Alloys: Science and Technology*. John Wiley & Sons.
9. García-Rodríguez S., Puentes J., Li X.C., Osswald T.A. (2014) Prediction of vortex height from mechanical mixing in metal matrix nanocomposite processing by means of dimensional analysis and scaling. *J. Manuf. Process.* 16. pp. 212–217. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.12.001.
10. Timofeev V.N., Khristinich R.M., Boyakov S.A., Rybakov S.A. (1998) *Sposob elektromagnitnogo peremeshivaniya elektroprovodnykh rasplavov* [Method of electromagnetic mixing of electrically conductive melts]. RF Patent 2113672.
11. Pavlov E.A., Bogovalov S.V., Timofeev V.N., Nadochiy D.S. (2006) Magnitogidrodinamicheskoe peremeshivanie alyuminievykh rasplavov v mikserakh soprotivleniya [Magnetohydrodynamic mixing of aluminum melt in resistance mixers]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii – Siberian Journal of Science and Technology.* 5(12). pp. 201–205.
12. Robles Hernández F.C., Sokolowski J.H. (2009) Effects and on-line prediction of electromagnetic stirring on microstructure refinement of the 319 Al–Si hypoeutectic alloy. *J. Alloys Compd.* 480. pp. 416–421. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.02.109.
13. Vorozhtsov S., Zhukov I., Vorozhtsov A., Zhukov A., Eskin D., and Kvetinskaya A. (2015) Synthesis of micro- and nanoparticles of metal oxides and their application for reinforcement of Al-based alloys. *Adv. Mater. Sci. Eng.* pp. 6. DOI: 10.1155/2015/718207.
14. Vorozhtsov S., Zhukov I., Promakhov V., Naydenkin E., Khrustalyov A., Vorozhtsov A. (2016) The influence of ScF₃ nanoparticles on the physical and mechanical properties of new metal matrix composites based on A356 aluminum alloy. *JOM.* 68(12). pp. 3101–3106. DOI: 10.1007/s11837-016-2141-5.