
Научная статья

УДК 669.018:669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-27-34

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg–Al–Zn–Mn

Н.В. Трофимов¹, М.С. Токарев¹, И.Ю. Мухина¹, З.П. Уридия¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты патентно-технических исследований в области технологий выплавки магниевых сплавов с использованием модификаторов с рафинирующей способностью, разработанных как российскими, так и зарубежными учеными и мировыми компаниями. Исследования сосредоточены на поиске технологий: изготовления модификаторов в виде таблеток; введения в расплав металлов порошков путем механического замешивания или в скомпактированном виде под флюсом; повышения экологичности процесса модифицирования при совместном введении солей и/или продувке инертными газами; применения внешних воздействий (ультразвука, вибраций, электромагнитного поля) совместно с вводом модификатора.

Ключевые слова: магниевый сплав, система «магний–алюминий», модифицирование, рафинирование, модификатор, состав, способ введения

Для цитирования: Трофимов Н.В., Токарев М.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П. Тенденции развития современных технологий модифицирования магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-27-34.

Scientific article

DEVELOPMENT TRENDS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR MODIFYING MAGNESIUM ALLOY SYSTEMS Mg–Al–Zn–Mn

N.V. Trofimov¹, M.S. Tokarev¹, I.Yu. Mukhina¹, Z.P. Uridia¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the results of patent and technical research in the field of developed technologies for smelting magnesium alloys using modifiers with refining ability of both Russian and foreign scientists and global companies. Research is focused on finding technologies production of modifiers in the form of tablets/bars/pieces; introducing powders into the melt of metals by mechanical mixing or in compacted form under a flux; increasing the environmental friendliness of the modification process with the joint introduction of salts and/or purging with inert gases; the use of external influences (ultrasound, vibrations, electromagnetic field) together with the input of a modifier.

Keywords: magnesium alloy, magnesium–aluminum system, modification, refining, modifier, composition, method of introduction

For citation: Trofimov N.V., Tokarev M.S., Mukhina I.Yu., Uridia Z.P. Development trends of modern technologies for modifying magnesium alloy systems Mg–Al–Zn–Mn. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-27-34.

Введение

В настоящее время остро стоят проблемы импортозамещения зарубежных материалов и технологий. К прочностным и коррозионным характеристикам современных изделий предъявляют серьезные требования. Увеличение производительности труда, сокращение продолжительности процесса изготовления изделий и экономия ресурсов также весьма актуальны для технологии производства отливок из сплавов на магниевой основе.

Модификаторы представляют собой отдельные химические элементы, комплексные минералы, добавки в виде металлических лигатур, которые при введении в расплав не влияют на химический состав, но изменяют структуру сплавов за счет ее измельчения, тем самым повышая уровень прочностных характеристик [1–6].

Существуют несколько направлений по усовершенствованию структуры магниевых сплавов:

- модифицирование расплава в результате обработки специально подобранными составами;
- рафинирование и дегазация адсорбционными методами для достижения необходимого уровня показателей качества и гарантированной эксплуатационной надежности изделий [7, 8];
- влияние на процесс кристаллизации физическими методами: электромагнитное и механическое перемешивание, воздействие вибраций, ультразвуковая обработка расплава и т. д.

Идеальный модификатор должен эффективно измельчать зерно, находиться в расплаве в измельченном, термически стабильном и когерентном с решеткой модифицируемого сплава состоянии, не снижать модифицирующий эффект в ходе всего технологического цикла и длительных выдержек при выплавке.

Модификаторы можно разделить на два типа. К первому типу относят модификаторы, замедляющие процесс охлаждения сплава под действием поверхностно-активных веществ, адсорбирующихся на зародышах зерен и препятствующих их росту. В результате образуются новые мелкие зародыши, которые активно разрастаются за счет уменьшения концентрации модификатора по отношению к количеству образовавшихся зерен.

К модификаторам второго типа относят так называемые инокуляторы. Инокуляторы используют для охлаждения расплава, что, в свою очередь, приводит к образованию новых областей кристаллизации с появлением небольших зерен и измельчению структуры.

Используются также комплексные модификаторы. В отличие от модификаторов первого и второго типа, комплексные модификаторы позволяют решать сразу несколько задач: легирование, рафинирование, дегазацию и инокуляцию. В состав таких модификаторов входят многокомпонентные нанодобавки, выполняющие широкий спектр модифицирующих функций.

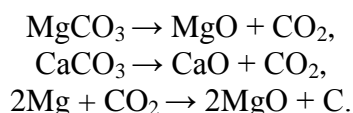
При производстве сплавов на магниевой основе, таких как МЛ5, МЛ5п.ч. и МЛ6, измельчение структуры является одной из основных операций. Благодаря процессу модифицирования повышаются уровни прочностных и технологических характеристик. Промышленный сплав на магниевой основе МЛ5-Т4 без модифицирования имеет предел прочности 180–220 МПа, а модифицированный аналог: 250–280 МПа. Одним из самых распространенных способов модифицирования для сплава МЛ5 является модифицирование магнезитом ($MgCO_3$) и мелом ($CaCO_3$). Способ заключается в введении компонентов при температуре до 740 °С и выдержке до 10–20 мин. В процессе

обработки из жидкого расплава интенсивно выделяются пузырьки газа, что приводит к загрязнению сплава, повышенному угару металла и дополнительному расходу флюса или защитной газовой среды.

Помимо потерь металла в результате окисления возникают потери вследствие загрязнения металла при взаимодействии магния с магнезитом. Опробованы и другие способы модифицирования:

- магнезитом и углекислым марганцем (0,25 % $MgCO_3$ + 0,25 % $MnCO_3$ или 0,2 % $MgCO_3$ + 0,5 % $MnCO_3$);
- гексахлорэтаном (C_2Cl_6);
- бескислородными модификаторами – фреонами R12, R13 и R14;
- фреоном R12 и аргоном в соотношении 50:50;
- металлическим сплавом в виде лигатуры, содержащей карбид алюминия Al_4C_3 .

Все рассмотренные модификаторы содержат углерод. В Европе отдают предпочтение гексахлорэтану, который применяют в виде таблеток в основном для модифицирования алюминиевых сплавов. Использование гексахлорэтана, содержащего помимо углерода большое количество хлора, может привести к флюсовой коррозии, особенно в условиях бесфлюсовой плавки, когда хлориды не осаждаются и не выводятся из расплава [9, 10]. При модифицировании природным магнезитом, а также в результате взаимодействия магниевых расплава с кислородом воздуха, газами печной атмосферы и оксидами других металлов возможны загрязнение расплава и протекание следующих реакций:



Возможно образование хлороксида $MgCl_2 \cdot MgO$.

Таким образом, при проведении патентного поиска уделяли внимание способам модифицирования, а также компонентам-модификаторам, с помощью которых достигаются наилучший механизм измельчения зерна и очищение расплава. В соответствии с указанными требованиями отобраны наиболее значимые патенты, включающие составы модификаторов, способы их изготовления и технологии применения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Известен способ изготовления модификатора, содержащего порошок фтортитаната калия, карбонат бария и углеродсодержащий материал. Смесь высыпают на поверхность расплава, затем замешивают на глубину. Модификатор равномерно измельчает структуру расплава и имеет продолжительный модифицирующий эффект [11].

Предложен метод выплавки сплава на магниевой основе в защитной среде газа без применения флюса [12], в качестве модификатора используется смесь хладона и аргона в соотношении 1:(1–3). Применение бескислородного модификатора способствует повышению уровня механических и коррозионных характеристик.

Российскими учеными (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) предложен способ модифицирования с использованием в составе модификаторов углекислого марганца и оксида кремния в соотношении (1,4–3):3 или отдельно углекислого марганца. Модификатор вводили при температуре до 750 °С в количестве до 0,7 % от массы расплава, после рафинирования температуру доводили до 790–810 °С и проводили выставление. Затем готовый сплав разливали по литейным формам [13].

Разработан модификатор [14], содержащий следующие компоненты, % (по массе): до 10,0 – железо, до 2,0 – марганец, до 0,5 – углерод, остальное – алюминий. Модификатор предназначен для магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn и вводится в расплав в количестве 0,5–1,2 % (по массе) при температуре 770–780 °С в течение 2–3 мин. Данный модификатор используют с целью измельчения структуры и повышения уровня механических свойств магниевых сплавов, упрощения и сокращения продолжительности процесса модифицирования, снижения безвозвратной потери металла.

Известен способ [15] модифицирования магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn, содержащих добавки циркония. Перед модифицированием при температуре 780 °С в расплав вводили добавки кальция и железа в количестве до 0,15 и 0,015 % от массы расплава соответственно с интервалом введения железа не менее 10 мин. После выдержки расплава в течение 20 мин при температуре 750 °С осуществляли модифицирование магнетитом, который вносили в количестве до 0,4 % от массы расплава. Изобретение решает основные задачи – исключение примесей циркония из сплавов системы на магниевой основе, легированной алюминием, снижение негативного влияния примеси циркония, повышение качества литья за счет уменьшения содержания в сплаве водорода и, как следствие, снижение возможности образования микрорыхлоты, а также получение мелкозернистой структуры и стабильных механических свойств сплава.

Российские исследователи из Южно-Уральского государственного университета [16] предложили использовать в качестве модификатора алмазный порошок. Модификатор вводят в количестве до 0,2 % от массы сплава при температуре расплава до 700–710 °С с одновременным воздействием на расплавленный металл лазерным излучением с энергией 0,4–0,9 Дж. Способ позволяет улучшить качество сплавов на магниевой основе и отливок из них за счет повышения уровня их характеристик.

В Ярославском государственном техническом университете разработан способ изготовления модификатора в виде спрессованных таблеток [17], содержащих фосфат алюминия, хлористый калий, гексахлорэтан и серу. Данный модификатор имеет стабильный эффект сразу после окончания реакции и сохраняет длительную модифицирующую способность. Фосфат алюминия и хлористый калий образуют легкоплавкую смесь, в процессе химической реакции высвобождается фосфор. Гексахлорэтан является основным рафинирующим соединением, а сера осушает шлак. Дегазация происходит за счет значительного количества пузырьков газообразной серы, которые выносят на поверхность твердые неметаллические включения и адсорбируют водород. Введение серы в количестве 0,05 % от массы расплава заменяет рафинирование сплава аргоном.

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева предлагает в качестве модификатора использовать шунгит, состоящий в основном из углерода. Шунгит занимает промежуточное положение между антрацитами и графитом [18]. При вводе шунгита в расплав наблюдается активное измельчение структуры – более чем в 2,5–3 раза по сравнению с эталоном.

ООО «Алюминиевые композиты» в патенте [19] раскрывает способ, включающий изготовление модификатора путем смешивания нанопорошков титана, углерода и порошка криолита. При добавлении нанопорошков в расплав, покрытый криолитом, проводили механическое перемешивание и/или ультразвуковую обработку и/или обработку электромагнитным полем. При использовании модификатора повышаются прочность и износостойкость изделий за счет образования наночастиц карбида титана, равномерно распределенного в расплаве.

Китайские исследователи в патенте [20] предложили использовать для модифицирования магниевых сплавов с различным содержанием алюминия фазы частиц $V\text{B}_2$

и $MgAl_2O_4$ разного размера. Модификаторы применяют в качестве гетерогенных центров зародышеобразования α -Mg в процессе затвердевания. В качестве сырья используют порошки ванадия и борной кислоты. По мнению авторов, наблюдается хороший рафинирующий эффект, модификатор обладает универсальностью для магниевых сплавов с различным содержанием алюминия и высокой устойчивостью к снижению эффективности рафинирования. Приготовление модификатора представляет собой несложный процесс, возможно крупномасштабное промышленное производство.

В изобретении [21] для модифицирования магниевых сплавов используют магниевую-алюминиевую шпинель ($MgAl_2O_4$) в количестве до 0,2 % от массы плавки, которая представляет собой материал с высокой температурой плавления, низкими коэффициентами линейного теплового расширения и теплопроводностью, хорошей термостойкостью и высокой устойчивостью к щелочной коррозии. Добавление данного вещества позволяет измельчить структуру и получить зерно размером до 40 мкм.

Включение таких элементов, как цинк и марганец, решает проблему низкого уровня механических свойств при литье [22]. Используемый модификатор содержит следующие компоненты, % (по массе): 25–60 – металлический цинк, 0,2–2 – металлический марганец и 38–73 – первичный магний. В модификаторе магниевое сплава чистота металлического цинка $\geq 99,99$ %, металлического марганца $\geq 99,9$ %, первичного магниевое слитка $\geq 99,95$ %. Способ получения модификатора магниевое сплава включает следующие этапы: нагрев до расплавления первичного магния в защитной атмосфере, добавление металлических цинка и марганца, плавление и равномерное перемешивание.

В патенте [23] использовали материал из магниевое-алюминиевое сплава, который содержит следующие компоненты, %: 56–60 – алюминий, 14–25 – магний, 0,45–0,78 – кремний, 20–25 – наполнители и 10–13 – модификации редкоземельных элементов. Магниевое-алюминиевое сплава приобретает новые свойства, а материал из него обладает высокой механической прочностью и необходимыми механическими характеристиками. Модификации редкоземельного элемента в основном представлены очищенными зёрнами и дендритными кристаллами. При комнатной температуре радиус атомов редкоземельных элементов больше, чем радиус атомов алюминия. При повышении температуры, когда редкоземельные элементы расплавляются в алюминии, поверхностные дефекты фазы сплава легко заполняются, поверхностное натяжение на двухфазной границе уменьшается, коррозионная стойкость улучшается.

Авторы патента [24] предлагают модификатор для литейных алюминиевых и магниевых сплавов, состоящий из следующих элементов, %: 8,5–12,0 – кремний; 1,0–4,0 – медь; 0,2–0,5 – магний; 0,55–0,7 – марганец; 0,05–0,1 – титан; 0,001–0,003 – бор; 0–0,2 – рений, а также 0–0,5 части примесного элемента. Такой состав модификатора обеспечивает хорошее извлечение отливок из формы, улучшает механические свойства сплава для литья под давлением, в частности ударную вязкость материала.

Заключения

На основе анализа охраняемых документов и научно-технической документации выявлены следующие тенденции в области составов модификаторов с рафинирующей способностью для сплавов на магниевой основе:

- введение в состав модификаторов карбонатов и углеродсодержащих соединений;
- изготовление модификаторов в виде таблеток;
- увеличение продолжительности действия модификатора за счет комплексного использования модификаторов первого и второго типов;

- применение методов порошковой металлургии – введение в расплав металлов в виде порошков путем механического замешивания или в скомпактированном виде под флюсом;
- улучшение экологии производства за счет сокращения содержания вредных добавок;
- совместное введение модификаторов и продувка инертными газами.

Многочисленные патенты и исследования в области модифицирования литейных магниевых сплавов указывают на необходимость создания новых модификаторов. Однако не все предлагаемые в обзоре способы позволяют эффективно измельчать зерно, некоторые из них дорогостоящие, требуют дополнительных затрат, энергоемки или нетехнологичны.

В связи с этим модифицирование как один из основных процессов, используемых при выплавке магниевых сплавов, требует создания комплексных модификаторов, оказывающих также рафинирующий эффект с целью сокращения количества применяемых флюсов.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам отдела «Управление интеллектуальной собственностью» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ за участие в поиске и обработке информации.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2023). DOI: 10.18577-6046-2022-0-2-32-51.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ9 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Мухина И.Ю., Уридия З.П., Трофимов Н.В. Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 15–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23.
6. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
7. Чухров М.В. Модифицирование магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 176 с.
8. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 488 с.
9. Мухина И.Ю. Основы технологии плавки магниевых сплавов в защитных средах // Литейное производство. 2021. № 1. С. 2–8.
10. Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.

11. Способ модифицирования алюминиево-кремниевых сплавов: пат. RU2623966C2 Рос. Федерация; заявл. 23.12.15; опубл. 29.06.17.
12. Способ модифицирования магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn: пат. RU2623965C2 Рос. Федерация; заявл. 23.12.15; опубл. 27.06.17.
13. Способ модифицирования магниевых сплавов: пат. RU2241775C1 Рос. Федерация; заявл. 26.11.03; опубл. 10.12.04.
14. Способ модифицирования магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn: пат. RU2030470C1 Рос. Федерация; заявл. 12.05.92; опубл. 10.03.95.
15. Способ модифицирования магниевых сплавов: пат. RU2617078C1 Рос. Федерация; заявл. 13.10.15; опубл. 19.04.17.
16. Способ модифицирования магниевых сплавов: пат. RU2610579C1 Рос. Федерация; заявл. 29.09.15; опубл. 13.02.2017.
17. Комплексный модификатор для алюминиево-кремниевых заэвтектических сплавов: пат. RU2287604C1 Рос. Федерация; заявл. 29.07.05; опубл. 20.11.06.
18. Шунгит как модификатор для алюминиево-кремниевых сплавов: пат. RU2609109C1 Рос. Федерация; заявл. 18.08.15; опубл. 30.01.17.
19. Способ получения модифицированных алюминиевых сплавов: пат. RU2567779C1 Рос. Федерация; заявл. 15.07.14; опубл. 10.11.15.
20. Способ измельчения зерна магниевых сплавов с различным содержанием алюминия: пат. CN114293054A; заявл. 05.12.11; опубл. 11.04.22.
21. Новое применение магниевое-алюминиевой шпинели: пат. CN108531760A; заявл. 17.04.18; опубл. 14.09.18.
22. Модификатор магниевого сплава и способ его получения: пат. CN102676898C; заявл. 18.05.12; опубл. 19.09.12.
23. Модификатор для магниевое-алюминиевого сплава и способ его получения: пат. CN115505804A; заявл. 28.09.22; опубл. 23.12.22.
24. Способ получения высокопрочного алюминиевого и магниевого сплавов: пат. CN108624788A; заявл. 17.03.17; опубл. 09.10.18.

References

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 26, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Mukhina I.Yu., Uridiya Z.P., Trofimov N.V. Corrosion-resistant casting magnesium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 15–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23.
6. Duyunova V.A., Volkova E.F., Uridiya Z.P., Trapeznikov A.V. Dynamics of the development of magnesium and cast aluminum alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
7. Chukhrov M.V. *Modification of magnesium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 176 p.
8. Emli E.F. *Fundamentals of technology for the production and processing of magnesium alloys*. Moscow: Metallurgy, 1972, 488 p.

9. Mukhina I.Yu. Fundamentals of technology for melting magnesium alloys in protective environments. *Liteynoe proizvodstvo*, 2021, no. 1, pp. 2–8.
10. Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM's contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
11. *Method for modifying aluminum-silicon alloys*: pat. RU2623966C2 Rus. Federation; appl. 23.12.15; publ. 29.06.17.
12. *Method for modifying magnesium alloys of the Mg–Al–Zn–Mn system*: pat. RU2623965C2 Rus. Federation; appl. 23.12.15; publ. 27.06.17.
13. *Method for modifying magnesium alloys*: pat. RU2241775C1 Rus. Federation; appl. 26.11.03; publ. 10.12.04.
14. *Method for modifying magnesium alloys of the Mg–Al–Zn–Mn system*: pat. RU2030470C1 Rus. Federation; appl. 12.05.92; publ. 10.03.95.
15. *Method for modifying magnesium alloys*: pat. RU2617078C1 Rus. Federation; appl. 13.10.15; publ. 19.04.17.
16. *Method for modifying magnesium alloys*: pat. RU2610579C1 Rus. Federation; appl. 29.09.15; publ. 13.02.2017.
17. *Complex modifier for aluminum-silicon hypereutectic alloys*: pat. RU2287604C1 Rus. Federation; appl. 29.07.05; publ. 20.11.06.
18. *Shungite as a modifier for aluminum-silicon alloys*: pat. RU2609109C1 Rus. Federation; appl. 18.08.15; publ. 30.01.17.
19. *Method for producing modified aluminum alloys*: pat. RU2567779C1 Rus. Federation; appl. 15.07.14; publ. 10.11.15.
20. *Method for grinding grains of magnesium alloys with different aluminum contents*: pat. CN114293054A; appl. 05.12.11; publ. 11.04.22.
21. *New application of magnesium-aluminum spinel*: pat. CN108531760A; appl. 17.04.18; publ. 14.09.18.
22. *Magnesium alloy modifier and method for its production*: pat. CN102676898C; appl. 18.05.12; publ. 19.09.12.
23. *Modifier for magnesium-aluminum alloy and method for its production*: pat. CN115505804A; appl. 28.09.22; publ. 23.12.22.
24. *Method for producing high-strength aluminum and magnesium alloys*: pat. CN108624788A; appl. 17.03.17; publ. 09.10.18.

Информация об авторах

Трофимов Николай Владимович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Токарев Максим Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мухина Инна Юрьевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Уридия Зинаида Петровна, ведущий научный сотрудник к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikolay V. Trofimov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim S. Tokarev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Inna Yu. Mukhina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Zinaida P. Uridia, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.11.2023.
The article was submitted 29.11.2023; approved and accepted for publication after reviewing 30.11.2023.