



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.721.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-628-639>

## Синтез магниевых лигатур при металлотермическом восстановлении соединений редкоземельных металлов

© С.А. Савченков\*, В.Л. Уголков\*\*

\*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

\*\*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Цель – изучение процесса получения лигатур «Mg-редкоземельные металлы» и определение перечня факторов магниетермического процесса для выявления оптимальных технологических режимов. В работе использованы различные современные методы анализа: рентгенофлуоресцентный проведен с помощью последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 («Shimadzu», Япония); идентификация фаз выполнялась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 («Shimadzu», Япония); комплексный термический проводился на установке STA 429 CD («NETZSCH», Германия) в алундовых тиглях с крышками в потоке аргона (с использованием держателя тиглей). В результате металлотермического восстановления неодима и гадолиния из фторидно-хлоридных расплавов магнием получены лигатуры «Mg-редкоземельные металлы» с различным процентным содержанием легирующих элементов. Предлагаемый способ восстановления редкоземельных металлов из фторидно-хлоридных расплавов позволяет извлекать неодим и гадолиний в процентном соотношении до 97,4%. Полученные лигатуры характеризуются однородностью и жидкотекучестью, что способствует их равномерной разливке по изложницам.

**Ключевые слова:** магниевые лигатуры, синтез лигатур, неодим, гадолиний, металлотермическое восстановление, фторидно-хлоридные расплавы

**Информация о статье:** Дата поступления 6 мая 2019 г.; дата принятия к печати 31 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Савченков С.А., Уголков В.Л. Синтез магниевых лигатур при металлотермическом восстановлении соединений редкоземельных металлов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;25(3):628–639. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-628-639

## Synthesis of magnesium master alloys under metallothermic reduction of rare earth metal compounds

Sergey A. Savchenkov, Valery L. Ugolkov

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

I.V. Grebenshchikov Institute of silicate chemistry, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract:** The purpose of the paper is to study the process of obtaining Mg-REM master alloys and determine the list of factors of the metallothermic magnesium process in order to identify optimal technological regimes. The study uses different modern methods of analysis. The X-ray fluorescence analysis was carried out using the XRF-1800 sequential X-ray fluorescence spectrometer (Shimadzu, Japan). Phase identification was performed with the use of the X-ray powder diffractometer XRD-6000 (Shimadzu, Japan). The complex thermal analysis was carried out using the STA 429 CD (NETZSCH, Germany) installation in alundum crucibles with lids in the argon stream using a Tg+DTA crucible holder. Master alloys of Mg-REM with different percentages of alloying elements have been obtained as a result of the metallothermic magnesium reduction of neodymium and gadolinium from fluoride-chloride melts. The proposed method of REM reduction from fluoride-chloride melts allows to extract neodymium and gadolinium in a percentage up to 97.4%. The obtained master alloys are homogeneous and fluid, well poured into molds.

**Keywords:** magnesium master alloys, master alloy synthesis, neodymium, gadolinium, metallothermic recovery, fluoride-chloride melts

**Information about the article:** Received May 6, 2019; accepted for publication May 31, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Synthesis of magnesium master alloys under metallothermic reduction of rare earth metal compounds. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;25(3):628–639. (In Russ.) 10.21285/1814-3520-2019-3-628-639

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные металлы (РЗМ) образуют с магнием интерметаллические соединения (ИМС), которые повышают жаропрочность и механические свойства, а также позволяют снизить окисляемость магниевых сплавов в жидком и твердом состояниях. Высокая жаропрочность сплавов с редкоземельными металлами (РЗМ) объясняется высокой дисперсностью продуктов распада при старении [1–9].

Согласно теоретическим положениям, разработанным А.А. Бочваром, высокую жаропрочность магниевых сплавов, содержащих РЗМ, обеспечивают:

1) создание сложнолегированного термически стабильного твердого раствора, а именно – введение трехвалентных РЗМ приводит к повышению сил межатомной связи в магнии;

2) создание гетерогенной дисперсной структуры в процессе старения за счет выделения фазы  $Mg_2RZM$ ;

3) повышение термической стабильности и температуры коагуляции упрочняющих фаз;

4) укрепление границ зерен, что достигается образованием тонкого каркаса частиц фаз, блокирующих границы зерен.

Анализ патентной активности позволяет сформировать общее понимание о тенденциях развития направления (магниевые сплавы с РЗМ) в России. В связи с этим были проанализированы патенты Российской Федерации, полученные в 1999–2019 годах, защищающие составы магниевых сплавов с РЗМ, а также способы их получения. Поиск проведен через информационно-поисковую систему «Интернет» портала Федерального института промышленной собственности в базе данных изобретений. Анализ динамики позволяет сделать вывод о том, что с 2008 г. наблюдается наращивание темпов развития направления, что говорит о проработанности его технологической базы, обеспечивающей возможность постоянного улучшения существующих магниевых сплавов с РЗМ (рис. 1).

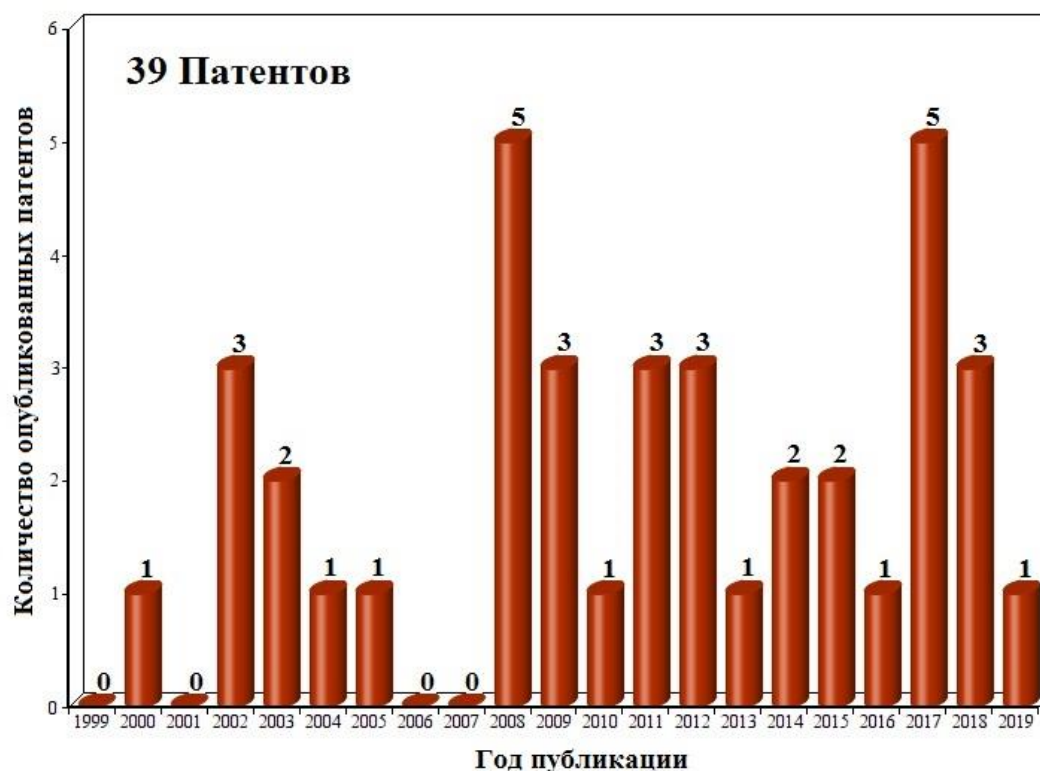


Рис. 1. Динамика патентной активности по годам  
Fig. 1. Dynamics of patent activity by years



В диапазоне с 2008 по 2019 год заявителями было в среднем получено 2 патента ежегодно на новые составы сплавов на основе магния с РЗМ. Спад в 2019 г. может быть обусловлен тем, что в настоящее время опубликованы не все патенты, заявки на которые поданы заявителями в интервале с 2017 по 2019 год.

Анализ правовых статусов опубликованных патентов позволяет понять, насколько высока важность полученных патентов для заявителей (рис. 2).

На основании распределения патентов по правовым статусам можно отметить высокий процент действующих патентов (84%), что говорит о высокой важности полученных патентов для правообладателей и желании поддерживать правовую охрану своих разработок.

Абсолютным лидером в патентовании технических решений среди предприятий, университетов и научно-исследовательских организаций выступает Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов в г. Москва, который имеет 10 патентов. Стоит подчеркнуть, что основными легирующими элементами из группы РЗМ в рассмотренных патентах (патентообладатели: Всероссийский научно-исследовательский институт авиа-

ционных материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, «Magnesium Elektron Limited», Ю.А. Щепочкина) являются неодим, гадолиний и иттрий.

Известно, что сплавы с РЗМ на основе магния и алюминия производят при введении лигатур, необходимость применения которых обусловлена повышением степени усвоения легкоокисляющихся легирующих элементов, а также малой скоростью растворения тугоплавких компонентов в чистом виде в расплаве. Учитывая характер распределения компонента в лигатурных материалах и скорость растворения его в расплавах магния и алюминия, можно получить заданное содержание легирующего компонента в сплаве добавлением в твердую шихту или непосредственно в расплав определенного количества лигатуры [10–17]. Одним из важных факторов, влияющих на процесс растворения лигатуры, является ее фазовый состав и морфология ИМС. От фазового состава лигатуры зависит ряд ее характеристик: технологичность, температура плавления и др.

Целью настоящего исследования является изучение процесса получения двойных лигатур Mg-Nd, Mg-Gd при металлотермическом восстановлении РЗМ из фторидно-хлоридных расплавов.

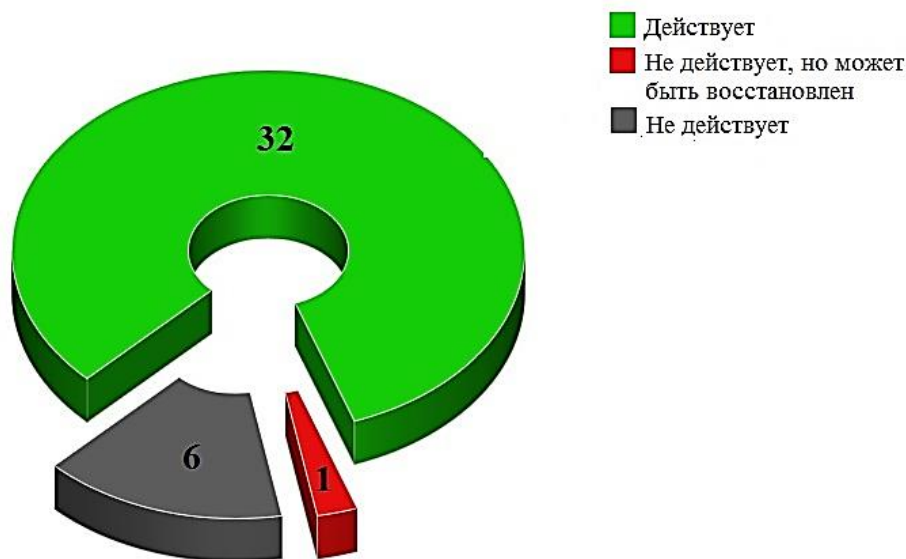


Рис. 2. Правовые статусы опубликованных патентов  
Fig. 2. Legal statuses of published patents

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование и выбор технологических параметров плавки осуществляли на основании проведенных поисковых опытов и анализа научно-технической информации в области основных технологических параметров получения магниевых лигатур.

Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429 CD немецкой фирмы «NETZSCH» в алуновом тиглях с крышками (в потоке аргона при скоростях нагрева и охлаждения  $10^{\circ}\text{C}$  в мин). При этом одновременно получали кривые изменения массы – ТГ (единица измерения в пер. с англ. «TG») в «%» от исходной навески и изменения кривых дифференциально-термического анализа (ДТА) в «мкВ/мг».

В качестве лабораторного оборудования была использована шахтная электропечь с карбидокремниевыми нагревателями. Для увеличения скорости протекания полной обменной реакции расплавленных солей с магнием все плавки проводились при перемешивании расплава при помощи стального импеллера.

Элементный анализ образцов полученных лигатур проводили при помощи последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 японской фирмы «Shimadzu». Идентификация фаз производилась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 фирмы «Shimadzu», снабженного высокотемпературной камерой HA1001 ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение, диапазон углов  $2\theta = 10\text{--}80^{\circ}$ , скорость съемки  $2^{\circ}/\text{мин}$ ). Металлографическое исследование образцов полученных лигатур выполняли на электронном микроскопе VEGA («TESCAN», Чехия) с энергодисперсионным спектрометром INCAx-act («Oxford», Англия).

Все опыты проводились с чушковым магнием марки Мг 90, квалификация исходных солей: KCl, NaCl,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  «х.ч.»,  $\text{NdF}_3$  и  $\text{GdF}_3$  марки «ч» (ТУ 6-09-4677-83). Плавки проводились по следующей ме-

тодике. Предварительно подготавливали технологическую солевую смесь, состоящую из  $35\text{KCl}+35\text{NaCl}+30\text{CaCl}_2$  и  $\text{NdF}_3$  или  $\text{GdF}_3$ . Кроме того, к солевой основе добавлялся  $\text{MgCl}_2$  не более 5% от массы фторида РЗМ и  $\text{CaF}_2$  (повышающий вязкость флюса и предотвращающий грануляцию полученной лигатуры компонент). Затем смесь тщательно перемешивалась, после чего данную солевую смесь совместно с магнием помещали в стальной тигель, который устанавливался в печь, выдерживали при заданной температуре в течение определенного времени при непрерывном перемешивании, после окончания восстановительной реакции расплав отстаивался заданное время, и происходило расслоение продуктов реакции: верхний слой – расплав солей; нижний – лигатура Mg-РЗМ. Далее поверхностный расплав солей сливали в шлаковую изложницу, а полученную лигатуру разливали в чушки. Технологичность процесса определялась следующими параметрами: процентным извлечением (выходом) РЗМ в лигатуру, ее жидкотекучестью, равномерным распределением РЗМ в полученных чушках и санитарными условиями труда.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления закономерностей магниетермического восстановления неода и гадолиния из фторидно-хлоридных расплавов были проведены термические исследования взаимодействия солевых смесей с магнием. На рис. 3 для сравнения показаны две термограммы, полученные при первом нагреве солевой смеси  $\text{KCl-NaCl-CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-CaF}_2\text{-NdF}_3$  без магния (I) и в присутствии магния (II), а на рис. 4 – две термограммы, полученные при их первом охлаждении.

При плавлении солевой смеси с магнием зафиксирован эндотермический эффект с максимумом при  $549^{\circ}\text{C}$ , соответствующий плавлению фторида неода в присутствии хлоридов, после которого зафиксирован замедленный экзотермический эффект с минимумом при  $605^{\circ}\text{C}$  (отсутствующий при нагреве солевой смеси без магния),



по всей видимости, соответствующий процессу восстановления неодима из фторидно-хлоридного расплава. Зафиксированный пик восстановления перекрывается пиком плавления магния в расплаве солей, дающий эндотермический эффект с максимумом при 666,1°C. При 706°C заканчива-

ются все превращения в исследуемой системе. При охлаждении солевой смеси с магнием на кривых четко наблюдается два тепловых экзотермических эффекта кристаллизации с минимумами при 508,4°C и 625,4°C, соответствующие кристаллизации солевой смеси и лигатуры Mg-Nd.

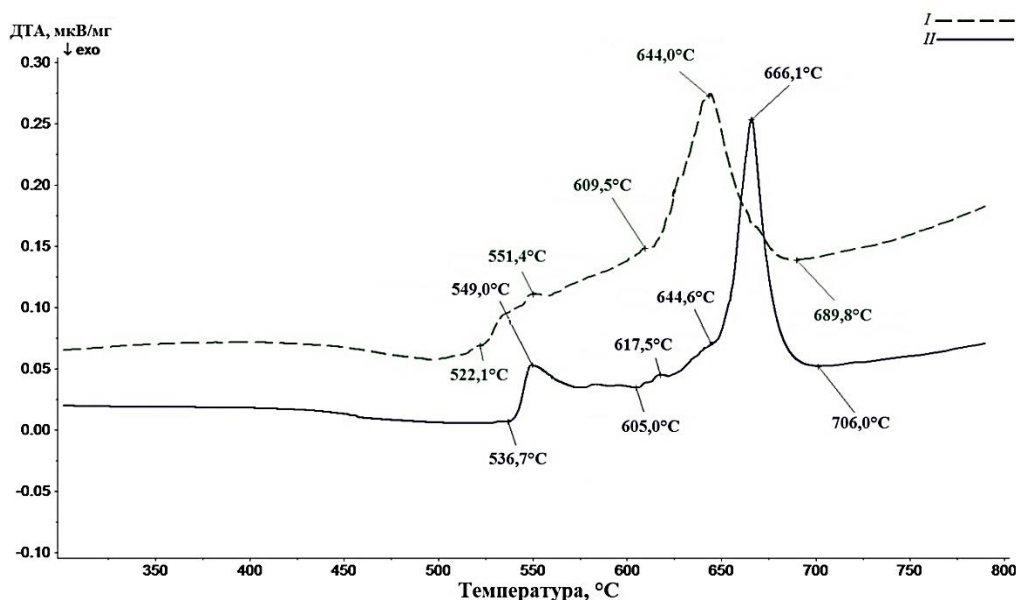


Рис. 3. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C  
Fig. 3. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

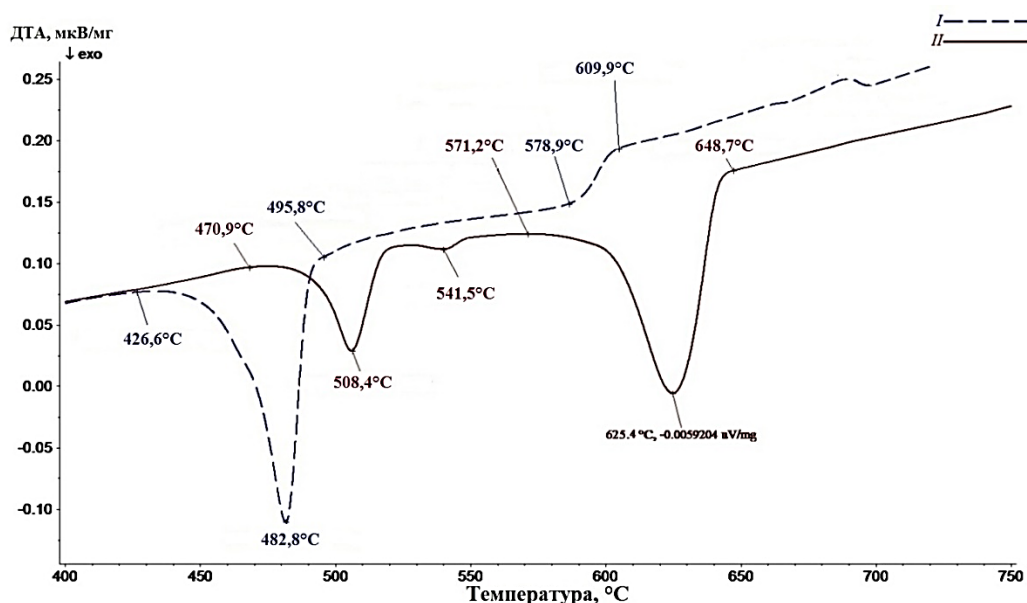


Рис. 4. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры охлаждения солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C  
Fig. 4. Curves of the differential thermal analysis and cooling temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

Элементный анализ полученного после термических исследований слитка лигатуры показал наличие в нем 19,16% масс. неодима.

На рис. 5 для сравнения показаны две

термограммы, полученные при первом нагреве солевой смеси  $KCl-NaCl-CaCl_2-MgCl_2-CaF_2-GdF_3$  без магния (I) и в присутствии магния (II), а на рис. 6 – две термограммы, полученные при их первом охлаждении.

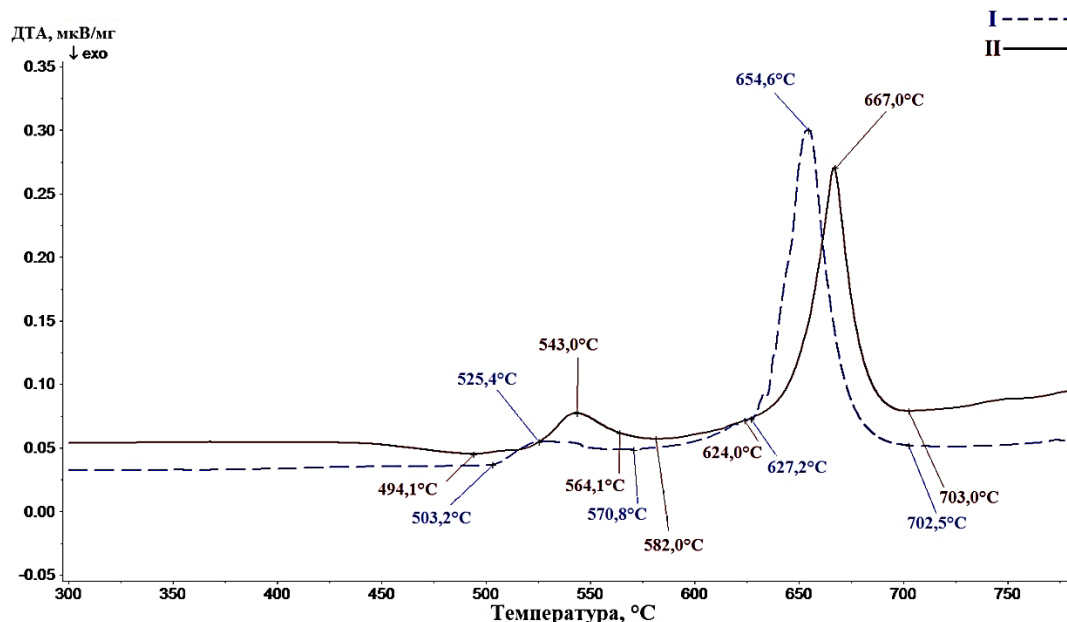


Рис. 5. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C

Fig. 5. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

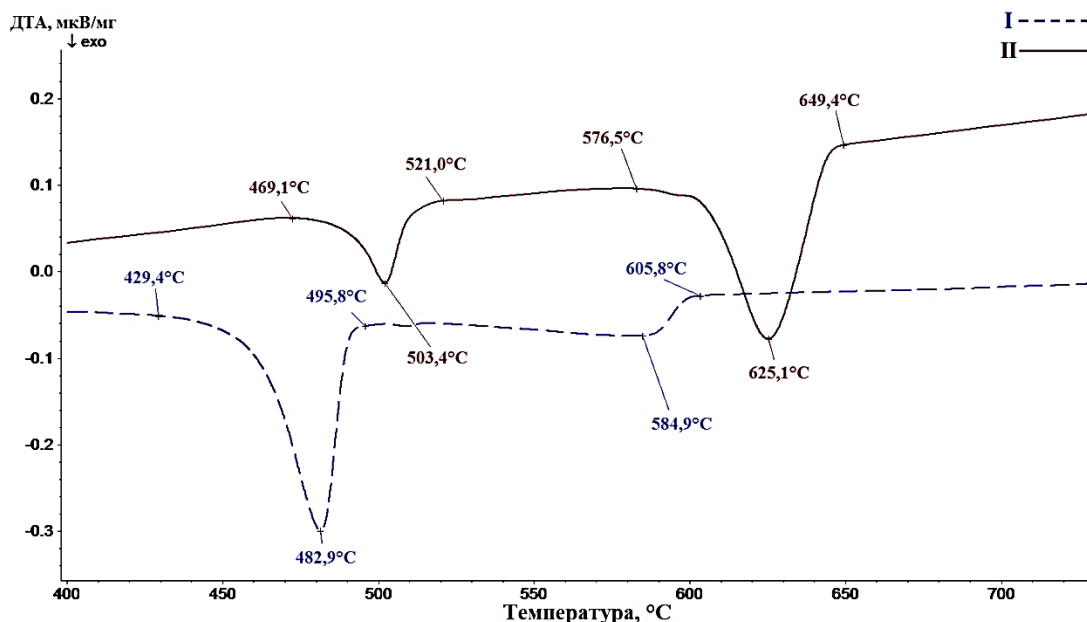


Рис. 6. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C

Fig. 6. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C





При первом нагреве солевой смеси с магнием можно отметить первый максимум при  $543,0^{\circ}\text{C}$ , соответствующий плавлению солевой смеси, после которого можно зафиксировать замедленный экзотермический эффект в диапазоне температур  $564,1\text{--}624,0^{\circ}\text{C}$  (отсутствующий при нагреве солевой смеси без магния) с минимумом при  $582,0^{\circ}\text{C}$ , который, в свою очередь, перекрывается эндотермическим пиком плавления магния с максимумом при  $667,0^{\circ}\text{C}$ . Вероятнее всего, отмеченный экзотермический эффект свидетельствует о протекании металлотермического процесса восстановления гадолиния из фторидно-хлоридного расплава. При охлаждении также можно наблюдать разницу в значении тепловых эффектов.

Расхождения в температурах экзотермических и эндотермических эффектов свидетельствуют о протекании реакции восстановления неодима и гадолиния из фторидно-хлоридного расплава.

На втором этапе для изучения скорости металлотермической реакции на границе раздела фаз «расплав магния-расплав флюса» проводились эксперименты по варьированию времени процесса при температурах  $690$ ,  $730$ ,  $800^{\circ}\text{C}$ . Для этого готовились идентичные по составу флюсы. Необходимое количество приготовленных флюсов и магния засыпалось в тигли, которые

помещались в шахтную печь и выдерживались  $5$ ,  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $25$ ,  $30$ ,  $35$ ,  $40$ ,  $45$ ,  $50$  мин после проплавления. После выдержки в течение заданного интервала времени тигель с расплавом извлекался из печи, проводилось разделение лигатуры и отработанного флюса, а также литья лигатуры в стальную изложницу, после чего осуществлялось отмывание тонкого слоя флюса, оставшегося на лигатуре, и далее определялось содержание РЗМ в ней. При различной выдержке десяти тиглей с одинаковым составом шихты скорость восстановления оценивали по изменению содержания РЗМ в лигатуре (в ходе протекания реакции в каждом тигле относительно расчетного). По результатам экспериментов построены зависимости изменения выхода РЗМ (неодим и гадолиний) в лигатуру от времени выдержки (рис. 7).

Установлено, что процесс восстановления проходит достаточно быстро ( $20\text{--}30$  мин), причем достигается извлечение неодима и гадолиния до  $96\%$  при  $730^{\circ}\text{C}$ , а процесс восстановления фторидов неодима и гадолиния сопровождается образованием однородной лигатуры  $\text{Mg-Nd}$ ,  $\text{Mg-Gd}$ . С повышением температуры до  $800^{\circ}\text{C}$  выход по РЗМ снижается, кроме того, значительно увеличиваются безвозвратные потери магния (до  $20\%$ ), а также повышается газосодержание лигатурного сплава.

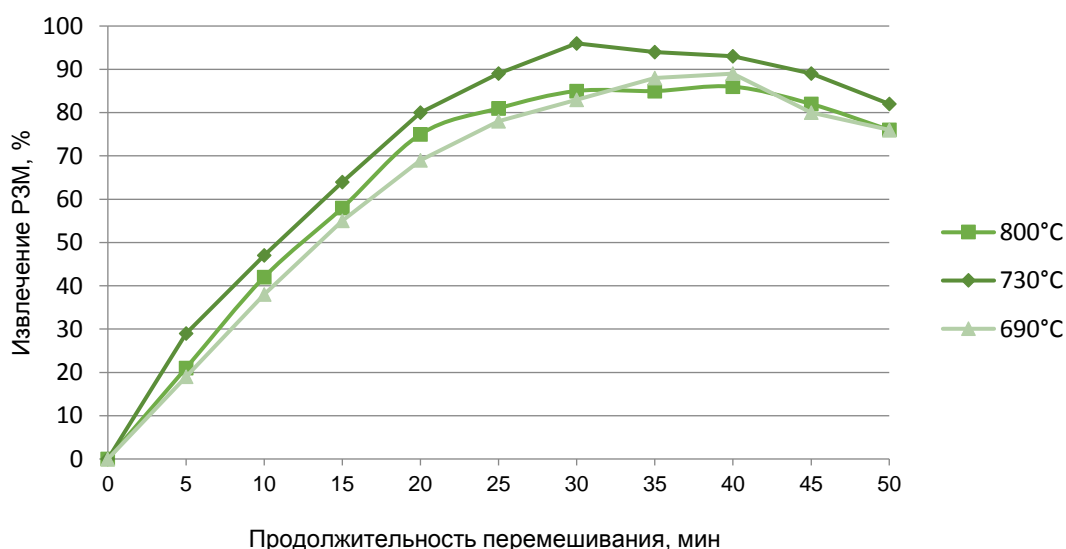


Рис. 7. Зависимость извлечения редкоземельных металлов от продолжительности перемешивания  
Fig. 7. Dependence of rare earth metal recovery on mixing duration

На следующем этапе были проведены плавки с учетом четырех факторов: в экспериментах регулировалась температура процесса, скорость вращения импеллера, время перемешивания, а также отношение «флюс: РЗМФ<sub>3</sub>». Каждой ячейке математического плана отвечают усредненные экспериментальные данные по результатам трех параллельных опытов. Исходные значения и результаты эксперимента по получению легатуры магний-неодим, магний-гадолиний приведены в табл. 1.

Экспериментально доказано, что оптимальные пределы регулирования температуры на стадии получения магниевой легатуры составляют 720–740°C, при данном температурном диапазоне затрачивается минимальное время (20–30 мин) на проведение реакции восстановления неодима и гадолиния. При отношении флюса к фториду РЗМ 4:1 создаются условия для получения легатуры в виде слитка, при меньшем отношении полученная легатура представлена гранулами.

В результате проведенных плавок были получены легатуры с содержанием

РЗМ от 20 до 35% масс., причем необходимое содержание РЗМ в легатуре достигалось корректировкой содержания фторидов РЗМ в технологической солевой смеси KCl-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>. Предложенный способ получения легатур магний-неодим, магний-гадолиний обеспечивает ее высокое качество. На рис. 8 представлены фотографии изломов чушек легатуры Mg-35Nd плавки № 16 (см. рис. 8 а) и легатуры Mg-30Gd плавки № 8 (см. рис. 8 б).

Полученные легатуры отвечают требованиям, предъявляемым к магниевым легатурам, макроструктура чушек чистая, однородная, плотная, при этом отсутствуют неметаллические, оксидные и газообразные включения.

Полученные легатуры по химическому составу соответствуют требованиям ТУ 48-4-271-91 «Легатура магний-неодим». Сравнительный анализ полученных легатур с ТУ по содержанию основных компонентов и контролируемых примесей представлен в табл. 2 в легатуре магний-гадолиний. Содержание основных контролируемых примесей также была сопоставлено с ТУ 48-4-271-91.

**Таблица 1**

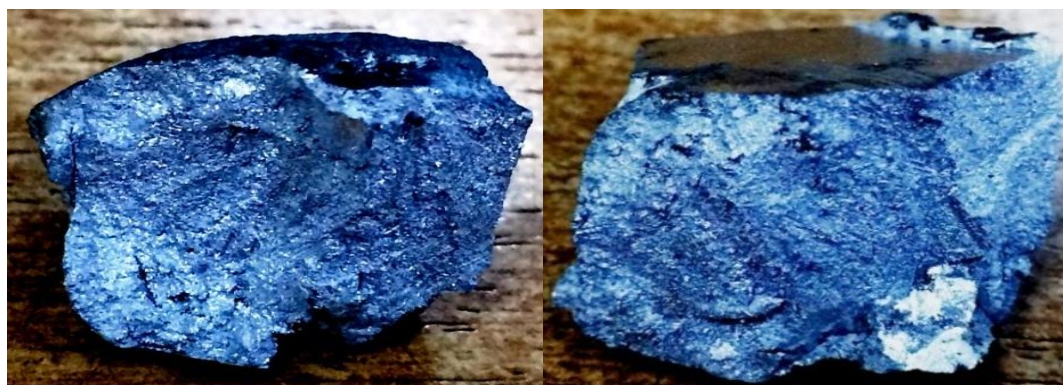
**Результаты синтеза легатуры Mg-РЗМ**

**Table 1**

**Results of Mg-REM master alloy synthesis**

№ опыта	Отношение флюс: РЗМФ <sub>3</sub>	T, °C	t, мин	Перемешивание, об/мин	Выход Nd, %	Выход Gd, %
1	2:1	690	20	150	66,2	60,4
2	4:1	690	20	150	89,8	87,2
3	2:1	740	20	300	67,4	66,9
4	4:1	740	20	300	95,1	96,1
5	2:1	690	30	300	68,4	60,2
6	4:1	690	30	300	96,9	96,4
7	2:1	740	30	150	69,2	63,4
8	4:1	740	30	150	97,2	96,0
9	2:1	690	20	300	64,2	61,7
10	4:1	690	20	300	95,4	96,1
11	2:1	740	20	300	65,6	61,1
12	4:1	740	20	300	96,2	96,8
13	2:1	690	30	150	62,1	52,3
14	4:1	690	30	150	88,2	88,0
15	2:1	740	30	300	71,2	66,2
16	4:1	740	30	300	97,4	97,0





a

b

Рис. 8. Лигатуры: а – Mg-35Nd; б – Mg-30Gd  
Fig. 8. Master alloys: a – Mg-35Nd; b – Mg-30Gd

Таблица 2

Химический состав полученных лигатур

Table 2

Chemical composition of obtained master alloys

№ опыта	Норма							
	Массовая доля, %							
	Основные компоненты		Контролируемые примеси, не более					
	Mg	Nd	La+Ce+Pr	Fe	Cu	Ni	Si	Al
Эталон	основа	20–35	2	0,15	0,1	0,01	0,05	0,05
Mg-Nd, № 8	основа	34,79	0,07	0,05	0,01	–	0,04	0,03
Mg-Nd, № 16	основа	34,22	0,12	0,07	0,03	–	0,03	0,04
Mg-Gd, № 8	основа	30,11	0,23	0,06	0,06	–	0,04	0,02
Mg-Gd, № 16	основа	29,89	0,34	0,08	0,04	–	0,04	0,03

Микроструктурный анализ полученных лигатур показал, что основой магниевой лигатуры являются упрочненные кристаллы магниевого твердого раствора, по границам которых располагается эвтектическая смесь сравнительно мягких кристаллов того же твердого раствора и кристаллов твердых ИМС. Лигатура магний-неодим представляет собой дендриты твердого раствора  $\alpha$ -Mg, окруженные ИМС состава  $Mg_{12}Nd$ . На рис. 8 представлены электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-Nd с содержанием неодима 35% масс. Микрорент-

геноспектральный анализ участков структуры показал, что интерметаллические соединения (светлые участки), содержат 31,6% масс. (7,22 ат.%) неодима, что соответствует фазе  $Mg_{12}Nd$ .

Микроструктура магниевых лигатур с гадолинием представлена большим количеством равноосных дендритов, присутствующих в магниевой матрице. Микрорентгеноспектральный анализ участков структуры показывает, что индивидуальные ИМС (светлые участки) содержат около 36% мас. гадолиния.

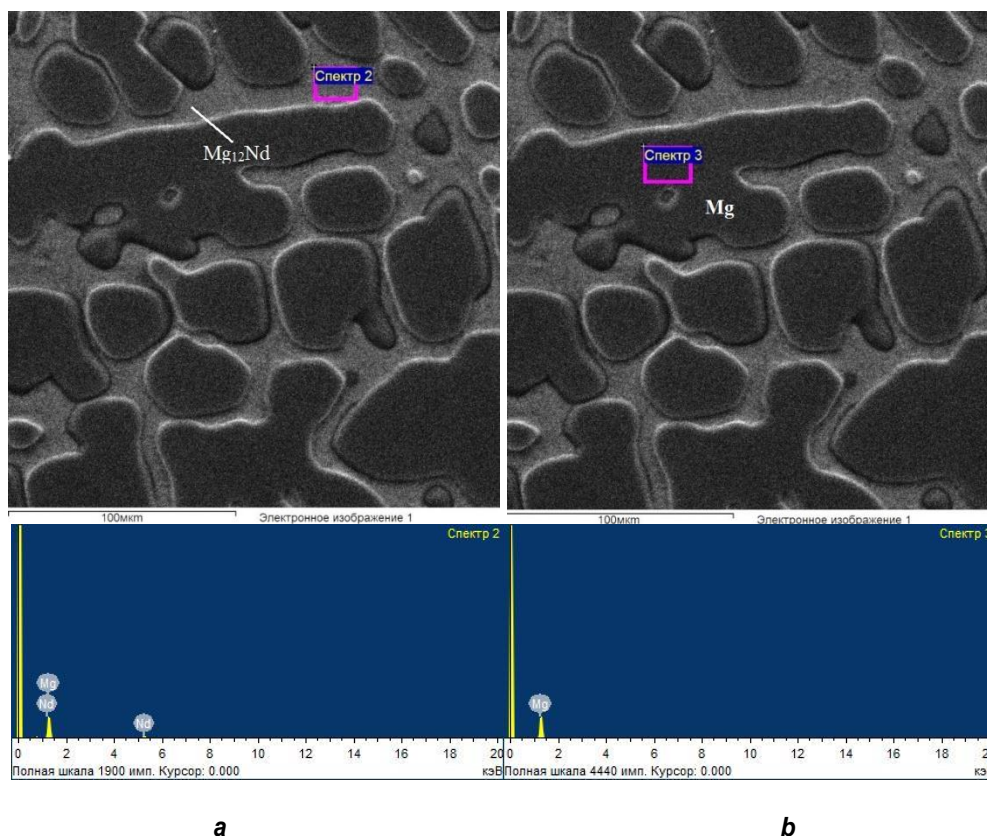


Рис. 8. Электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-35Nd: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$   
Fig. 8. Electronic images of Mg-35Nd master alloy microstructure: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$

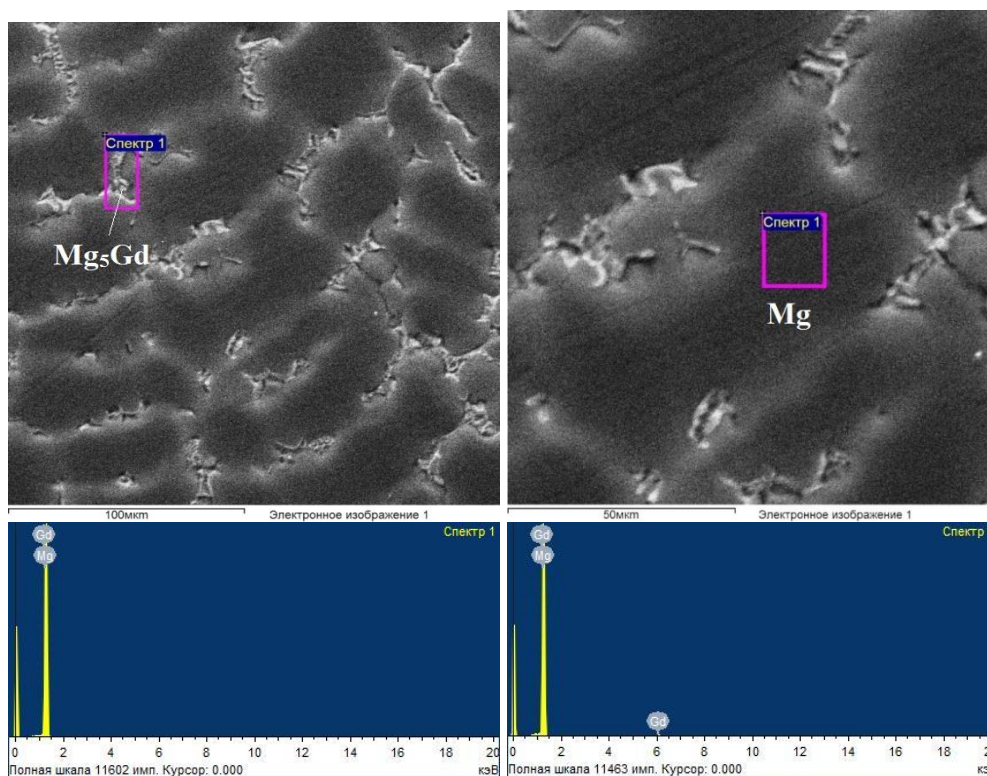


Рис. 9. Электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-35Nd: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$   
Fig. 9. Electronic images of Mg-35Nd master alloy microstructure: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$



#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате дифференциально-термического анализа определены интервалы температур тепловых эффектов при плавлении (начало плавления 520,4°C) компонентов солевой смеси KCl-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>-NdF<sub>3</sub>(GdF<sub>3</sub>), а также при проведении процесса магнийтермического восстановления РЗМ из солевой смеси. Установлены экзотермические эффекты восстановления в диапазоне температур 582–623,7°C.

Разработан способ получения лигатуры магний-неодим и магний-гадолиний магнийтермическим восстановлением РЗМ из хлоридно-фторидного расплава при использовании в качестве технологической со-

левой смеси следующих солей: KCl, NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>. Установлено, что при температуре на стадии синтеза магниевой лигатуры от 720 до 740°C затрачивается минимальное время (20–30 мин) на проведение реакции восстановления неодима и гадолиния. При выдерживании необходимых технологических параметров обеспечивается стабильный выход неодима и гадолиния в лигатуру от 96 до 97,4%.

Анализ микроструктуры показал, что строение образцов полученной лигатуры магний-неодим, магний-гадолиний представляет собой дендриты твердого раствора α-Mg, по границам которых располагаются интерметаллические соединения типа Mg<sub>x</sub>РЗМ<sub>y</sub>.

#### Библиографический список

1. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. *Металловедение редкоземельных металлов*. М.: Наука, 1975. 272 с.
2. Рохлин Л.Л. Исследования магниевых и алюминиевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы, в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН // *Цветные металлы*. 2011. № 5. С. 74–77.
3. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Тарытина И.Е., Добаткин С.В. Исследования для разработки новых конструкционных магниевых сплавов с редкоземельными металлами // *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 44–53.
4. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Бецофен С.Я., Акинина М.В. Исследование влияния РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп на свойства магниевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2014. № 2. С. 42–48.
5. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Исследование свойств высокопрочного магниевого сплава системы Mg-Y-Gd-Zr // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 12. С. 15–18.
6. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). С. 2–12.
7. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Цветные металлы*. 2013. № 9. С. 71–78.
8. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of Mg-10Y Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2013. Vol. 42. Issue 10. P. 2009–2013.
9. Кавалла Р., Бажин В.Ю. Изотропность свойств листовых заготовок из магниевых сплавов // *Записки Горного института*. 2016. Т. 222. С. 828–832.
10. Белкин Г.И. *Производство магний-циркониевых лигатур и сплавов*. М.: Металлургиздат, 2001. 146 с.
11. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of Different State Mg-5Sr-10Y Master Alloys on the Microstructure Refinement of AZ31 Magnesium Alloy // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2013. Vol. 42. Issue 12. P. 2421–2426.
12. Косов Я.И., Бажин В.Ю. Синтез лигатуры алюминий-эрбий из хлоридно-фторидных расплавов // *Расплавы*. 2018. № 1. С. 14–28.
13. Савченков С.А., Бажин В.Ю. Синтез магниевых лигатур во фторидно-хлоридных расплавах // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 5. С. 214–224.
14. Скачков В.М., Яценко С.П. Получение Sc-, Zr-, Hf-, Y-лигатур на основе алюминия методом высокотемпературных обменных реакций в расплавах солей // *Цветные металлы*. 2014. № 3. С. 22–26.
15. Савченков С.А., Уголков В.Л. Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. С. 187–196.
16. Попова Э.А., Котенков П.В. Влияние состава лигатуры Al-Zr-Y на эффект модифицирования сплава Al-4% Cu // *Расплавы*. 2016. № 2. С. 185–192.
17. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Preparation of novel Al Er master alloys in chloride-fluoride melt // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 918. P. 21–27.

#### References

1. Savickij E.M., Terekhova V.F. *Metallovedenie redkozemel'nyh metallov* [Metal Science of rare earth metals]. Moscow: Nauka Publ., 1975, 272 p. (In Russ.).
2. Rohlin L.L. Researches of magnesium and aluminium alloys, contained rare-earth metals at the Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian

Academy of Sciences. *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2011, no. 5, pp. 74–77. (In Russ.).

3. Rohlin L.L., Dobatkina T.V., Luk'yanova E.A., Tarytina I.E., Dobatkin S.V. Researches for development of new structural magnesium alloys with rare earth metals. *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of Light Alloys], 2018, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.).

4. Volkova E.F., Rohlin L.L., Becofen S.Ya., Akinina M.V. Investigation of the effect of RE yttrium and cerium subgroup elements on magnesium base alloy properties. *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of Light Alloys], 2014, no. 2, pp. 42–48. (In Russ.).

5. Rohlin L.L., Dobatkina T.V., Nikitina N.I., Tarytina I.E. Studying properties of high-strength magnesium alloy of Mg-Y-Gd-Zr system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat treatment], 2010, no. 12, pp. 15–18. (In Russ.).

6. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. Ways to improve the basic mechanical properties of magnesium wrought alloys. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10 (58), pp. 2–12. (In Russ.).

7. Dyunova V.A., Goncharenko E.S., Muhina I.Yu., Uridiya Z.P., Volkova E.F. Science heritage of Academician I. N. Fridlyander. Modern investigations of magnesium and casting aluminium alloys in all-Russian scientific research institute of aviation materials "VIAM". *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2013, no. 9 pp. 71–78. (In Russ.).

8. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of Mg-10Y Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, vol. 42, issue 10, pp. 2009–2013.

9. Kavalla R., Bazhin V.Yu. Isotropic properties of sheet blanks of magnesium alloys. *Zapiski Gornogo instituta*

[Journal of Mining Institute], 2016, vol. 222, pp. 828–832. (In Russ.).

10. Belkin G.I. *Proizvodstvo magnij-cirkonievyyh ligatur i splavov* [Production of magnesium-zirconium master alloys and alloys]. Moscow: Metallurgizdat Publ., 2001, 146 p. (In Russ.).

11. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of different state Mg-5Sr-10Y master alloys on the microstructure refinement of AZ31 magnesium alloy. *rare metal materials and engineering*, 2013, vol. 42, issue 12, pp. 2421–2426.

12. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Synthesis of aluminium-erbium master alloy from chloride-fluoride melts. *Rasplavy* [Melts], 2018, no. 1, pp. 14–28. (In Russ.).

13. Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu. Synthesis of magnesium master alloys in fluoride-chloride melts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 5, pp. 214–224. (In Russ.).

14. Skachkov V.M., Yacenko S.P. Preparation of Sc-, Zr-, Hf-, Y-master alloys by the method of high-temperature exchange reactions in molten salts. *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2014, no. 3, pp. 22–26. (In Russ.).

15. Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 187–196. (In Russ.).

16. Popova E.A., Kotenkov P.V. Influence of Al-Zr-Y master alloy composition on modification effect of Al-4% Cu alloy. *Rasplavy* [Melts], 2016, no. 2, pp. 185–192. (In Russ.).

17. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Preparation of novel Al Er master alloys in chloride-fluoride melt. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 918, pp. 21–27.

#### Критерии авторства

Савченков С.А., Уголков В.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Савченков Сергей Анатольевич**,  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru

**Уголков Валерий Леонидович**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова,  
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия,  
e-mail: ugovkov.52@mail.ru

#### Authorship criteria

Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey A. Savchenkov**,  
Postgraduate,  
St. Petersburg Mining University,  
21 Line, 2, Vasilievsky Ostrov, St. Petersburg 199106,  
Russia,  
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru

**Valery L. Ugolkov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,  
I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry,  
2 Naberezhnaya Makarova, St. Petersburg 199034, Russia,  
e-mail: ugovkov.52@mail.ru