



Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей

© С.А. Савченков*, В.Л. Уголков**

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме: Цель – изучение процесса получения лигатур Mg-Zn-РЗМ и определение перечня факторов магниетермического процесса для выявления оптимальных технологических режимов. В работе использованы различные современные методы анализов. Рентгенофлуоресцентный анализ проведен с помощью последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 (Shimadzu). Идентификация фаз выполнялась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 (Shimadzu). Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429 CD (NETZSCH) в алундовых тиглях с крышками, в потоке аргона (с использованием держателя тиглей типа «TG+DTA»). В результате металлотермического восстановления неодима, гадолиния и иттрия из фторидно-хлоридных расплавов магнием в присутствии цинка получены лигатуры Mg-Zn-РЗМ с различным процентным содержанием легирующих элементов. Предлагаемый способ восстановления РЗМ из фторидно-хлоридных расплавов позволяет извлекать неодим, гадолиний и итрий в процентном соотношении до 99,6%. Полученные лигатуры характеризуются однородностью и жидкотекучестью, что способствует их равномерной разливке по изложницам.

Ключевые слова: магниевые лигатуры, неодим, гадолиний, итрий, металлотермическое восстановление, хлоридно-фторидные расплавы

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 25 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Савченков С.А., Уголков В.Л. Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):187–196. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-187-196.

Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts

Sergey A. Savchenkov, Valery L. Ugolkov

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg 199106, Russian Federation

Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences (ISC RAS), St. Petersburg 199106, Russian Federation

Abstract: The paper deals with the process of obtaining Mg-Zn-REM (rare earth metal) master alloys and determination of the list of factors of the magnesium thermal process in order to identify optimal technological regimes. The study uses modern analysis methods. X-ray fluorescence analysis is carried out using the XRF-1800 sequential X-ray fluorescence spectrometer (Shimadzu). Phase identification is performed with the use of X-ray powder diffractometer XRD-6000 (Shimadzu). A complex thermal analysis is carried out on the STA 429 CD (NETZSCH) installation in alundum crucibles with lids in the argon stream using a crucible holder of the Tg+DTA type. As a result of the metallothermic reduction of neodymium, gadolinium and yttrium from fluoride-chloride melts by magnesium in the presence of zinc the master alloys Mg-Zn-REM have been obtained with different percentages of alloying elements. The proposed method of REM recovery from fluoride-chloride melts allows to extract neodymium, gadolinium and yttrium in the percentage ratio up to 99.6%. The obtained master alloys are homogeneous and fluid, able to be evenly poured into molds.

Keywords: magnesium master alloys, neodymium, gadolinium, yttrium, metallothermic recovery, fluoride-chloride melts
Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication January 25, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: 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;23(1):187–196. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-187-196.



Введение

Достижение повышенных прочностных и жаропрочных свойств в литейных магниевых сплавах осуществляется путем их легирования перспективными элементами, включая выбор и оптимизацию режимов термической обработки. Перспективным может быть комплексное легирование несколькими редкоземельными металлами (РЗМ) иттриевой (Y, Nd) и цериевой (Ce, La, Pr) подгрупп в разных соотношениях. Введение иттрия, неодима и гадолиния в определенных соотношениях в систему магний-цинк-цирконий приводит к значительным изменениям фазового состава сплава, повышению термической стабильности твердого раствора и упрочняющих фаз [1–5]. Известно, что РЗМ вводят в магниевые и алюминиевые сплавы в виде лигатур, которые получают двумя основными способами: сплавлением чистых компонентов и восстановлением легирующего металла из его соединений [6–10]. Наибольший практический

интерес представляет разработка технологии получения тройных магниевых лигатур металлотермическим способом восстановления РЗМ из их соединений, при обеспечении высокого выхода восстанавливаемого редкоземельного металла [11–13]. Введение цинка в состав лигатур магний-неодим, магний-гадолиний, магний-иттрий обеспечивает снижение их температуры плавления и увеличивает растворимость в них редкоземельных металлов. Применение тройных лигатур магний-цинк-РЗМ может быть эффективно использовано при производстве магниевых сплавов, содержащих цинк и РЗМ (неодим, гадолиний, иттрий), например, в системах: Mg-Zn-Y-Nd, Mg-Gd-Y-Zn-Mn, Mg-Y-Zn-Zr [14–18].

Целью настоящего исследования является изучение процесса получения тройных лигатур Mg-Zn-Nd, Mg-Zn-Gd, Mg-Zn-Y из хлоридно-фторидных расплавов.

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 алундовых тиглях с крышками в потоке аргона при скоростях нагрева и охлаждения 10°C в минуту (с использованием держателя тиглей типа «TG+DTA» с термопарами типа «S» (Pt-PtRh10)). При этом одновременно получали кривые изменения массы – TG в «%» от исходной навески и кривые изменения DTA в «μV/mg».

В качестве лабораторного оборудования была использована шахтная электропечь с карбидокремниевыми нагревателями. Для увеличения скорости протекания полной обменной реакции расплавленных солей с магнием и цинком 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 (CuK_α-излучение, диапазон углов 2θ = 10–80°, скорость съемки 2°/мин). Металлографическое исследование образцов полученных лигатур выполняли на оптическом микроскопе Axio Lab.A1 немецкой фирмы Carl Zeiss.

Все опыты проводились с чушковым магнием марки Mg 98 и гранулированным цинком (ч.д.а.) с варьированием их процентного соотношения, при этом в роли восстановителя выступал магний, а цинк выполнял функцию термического возбудителя реакции. Квалификация исходных солей: YF₃, KCl, NaCl, CaCl₂ «х.ч.», NdF₃ и GdF₃ «ч» (ТУ



6-09-4677-83). Плавки проводились по следующей методике. Предварительно подготавливали технологическую солевую смесь, состоящую из хлоридов щелочных и щелочноземельных элементов и одного из фторидов РЗМ, а именно $35\text{KCl} + 35\text{NaCl} + 30\text{CaCl}_2$ и NdF_3 , GdF_3 и YF_3 . Затем смесь тщательно перемешивалась, после чего перемешенную солевую смесь совместно с магнием и цинком помещали в тигель, который устанавливался в печь, выдерживали при заданной температуре в течение определенного времени при непрерывном перемешивании,

после окончания восстановительной реакции расплав отстаивался заданное время, в течение которого происходило расслоение продуктов реакции: верхний слой – расплав солей; нижний – лигатура Mg-Zn-PZM . 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.

Результаты исследования

Для выявления закономерностей магнитермического восстановления неодима, гадолиния и иттрия из фторидно-хлоридных расплавов были проведены термические исследования взаимодействия солевых смесей с магнием и цинком. На рис. 1–3 представлены кривые T , TG и DTA , полученные при первом нагревании и первом охлаждении чушкового магния, гранулированного цинка в соотношении 1:2 совместно с солевой смесью KCl , NaCl , CaCl_2 и NdF_3 , YF_3 и GdF_3 в динамическом потоке аргона при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 780°C , и скоростью $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 800°C с последующим охлаждением расплава со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Масса навесок составляла 310 мг.

Выявлено, что после расплавления (эндотермический эффект с максимумом при $435,5^\circ\text{C}$) цинк активно начинает взаимодействовать с магнием, что характеризуется экзотермическим пиком с минимумом при $446,6^\circ\text{C}$. При температуре минимума $573,2^\circ\text{C}$ наблюдается второй экзотермический эффект, свидетельствующий о протекании процесса восстановления фторида неодима магний-цинковым расплавом. Эндотермический эффект с максимумом при $696,4^\circ\text{C}$, лучше всего соответствуют плавлению солевой смеси, которая при охлаждении дает тепловой эффект кристаллизации при $723,6^\circ\text{C}$. Кроме того, на кривых охлаждения четко наблюдается два тепловых эффекта кристаллизации металлических

фаз с максимумами при $512,0^\circ\text{C}$ и $325,3^\circ\text{C}$, соответствующие кристаллизации образовавшегося тройного соединения Mg-Zn-Nd , и магний-цинкового сплава. Потери массы в диапазоне температур $90\text{--}190^\circ\text{C}$ можно объяснить испарением влаги из солевой смеси. Потери массы в диапазоне $760\text{--}800^\circ\text{C}$ можно объяснить угаром магния и цинка, при этом за цикл нагрева и охлаждения суммарные потери составили 2,49 % от массы навески.

При нагревании смеси солей $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ (рис. 2) отмечено начало плавления цинка при температуре $409,9^\circ\text{C}$ с максимумом при $433,7^\circ\text{C}$, при этом после окончательного расплавления цинка прослеживается начало его взаимодействия с магнием, с экзотермическим эффектом, с минимумом при $494,7^\circ\text{C}$. Последующий экзотермический эффект с минимумом при $559,3^\circ\text{C}$, вероятнее всего, соответствующий процессу восстановления гадолиния магний-цинковым расплавом. Эндотермический эффект с максимумом при $613,2^\circ\text{C}$, вероятно, соответствует плавлению солевой смеси, а максимум при $653,1^\circ\text{C}$ соответствует плавлению непрореагировавшего магния. На кривой охлаждения обнаруживается максимум эндотермического эффекта кристаллизации металлической фазы при $512,9^\circ\text{C}$, соответствующий кристаллизации образовавшегося тройного соединения Mg-Zn-Gd . За цикл нагрева и охлаждения суммарные потери составили 1,99 % от массы навески.

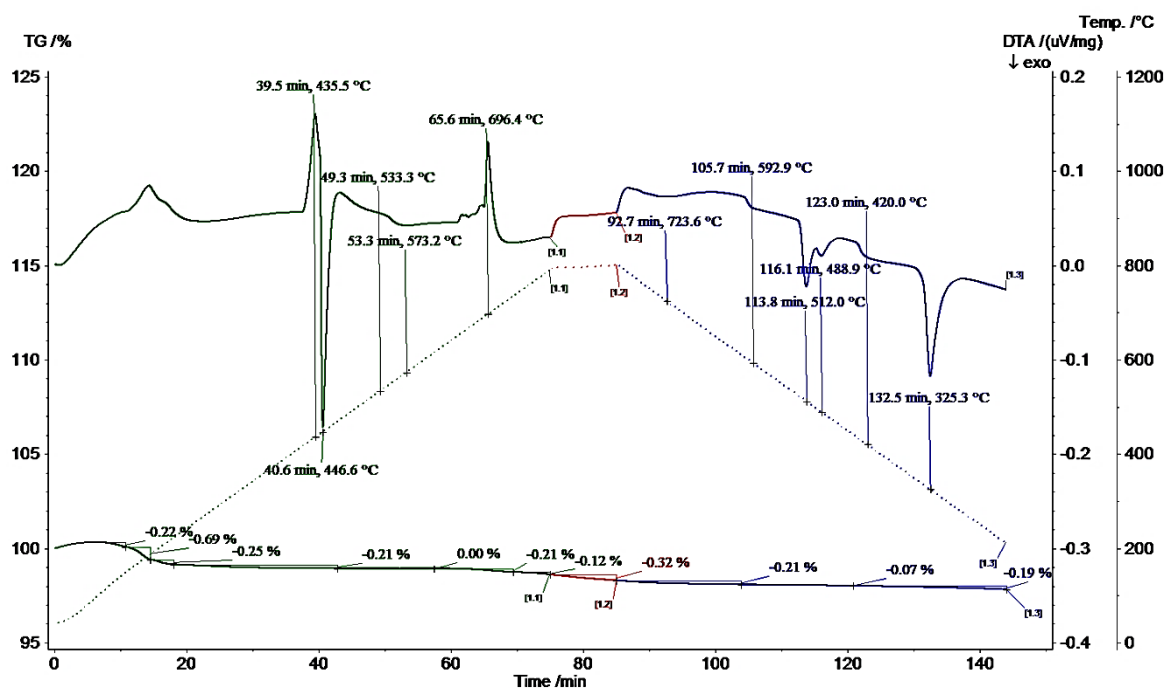


Рис. 1. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $\text{Mg-Zn-NdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ в зависимости от времени при нагревании до 800 °C
Fig. 1. Curves TG, DTA and T of the studied sample $\text{Mg-Zn-NdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ as a function of time when heated to 800 °C

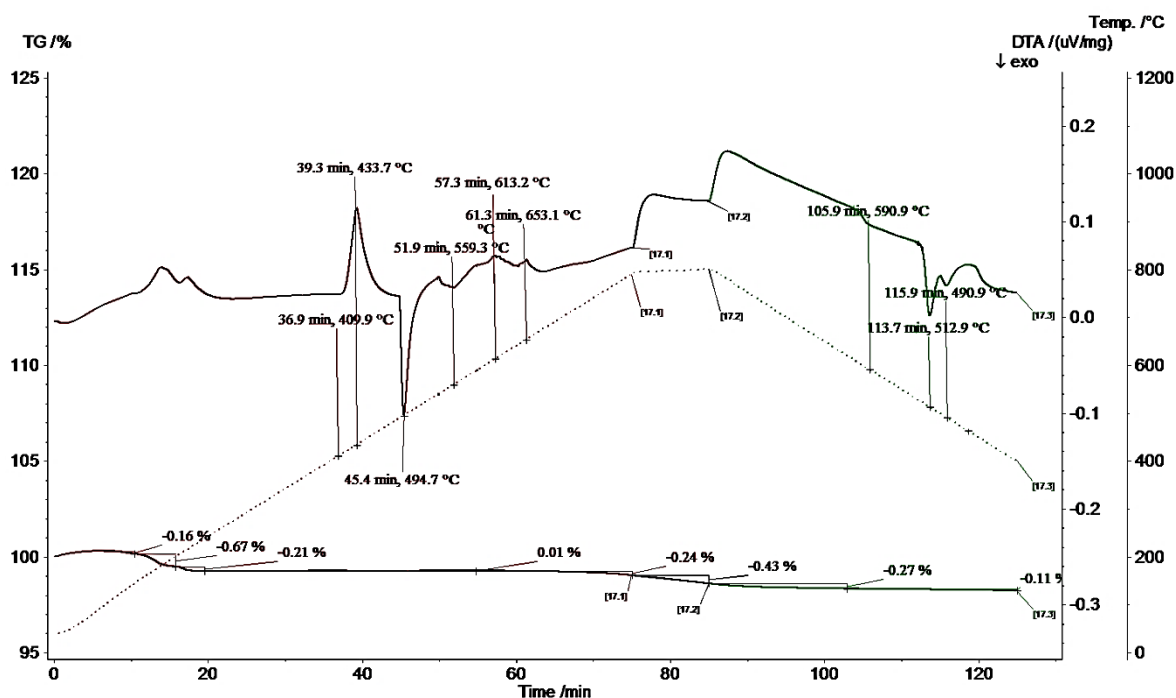


Рис. 2. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ в зависимости от времени при нагревании до 800 °C
Fig. 2. Curves TG, DTA and T of the studied sample $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ as a function of time when heated to 800 °C



Характер взаимодействия магния и цинка с фторидом иттрия в расплаве хлоридов $KCl-NaCl-CaCl_2$ (рис. 3) аналогичен взаимодействию с фторидами неодима и гадолиния. Плавление цинка сопровождается эндотермическим эффектом с максимумом при $434,7^\circ C$, после чего данный эффект перекрывается экзотермическим эффектом взаимодействия расплавленного цинка и магния с минимумом при $445,6^\circ C$ и последующим экзотермическим эффектом с минимумом при $585,3^\circ C$; вероятнее всего, данный пик свидетельствует о протекании экзотермической реакции восстановления иттрия. Начиная от этого значения температуры происходит поглощение тепла при плавлении солей с максимумом при $596,2^\circ C$, а при $640^\circ C$ проявляется еще один пик, характеризующий плавление солевой смеси. На кривых охлаждения обнаруживается максимумы эндотермических эффектов кристаллизации металлических фаз при $509,9^\circ C$, соответствующие кристаллизации образовавшегося тройного соединения $Mg-Zn-Y$ и $320,2,9^\circ C$, соответствующие кристаллизации образовавшегося магний-цинкового сплава. Максимумы эндотермических эф-

фектов ($588,8$ и $351,1^\circ C$) соответствуют кристаллизации солевой смеси. Потери массы в диапазоне температур $100-200^\circ C$, так же, как и в предыдущих опытах, можно объяснить испарением влаги из солевой смеси. Значительные потери массы при температуре $720-800^\circ C$ связаны с угаром магния и цинка. Суммарные потери составили $3,65\%$.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования получения лигатур $Mg-Zn-Nd$, $Mg-Zn-Gd$, $Mg-Zn-Y$. Температурные режимы плавки регулировались в соответствии с проведенным термическим анализом, время выдержки варьировалось от 10 до 40 минут, все плавки также проводились с использованием механического перемешивания.

В таблице приведены результаты одной серии опытов, характеризующие показатели процесса.

В результате проведенных плавки были получены лигатуры с содержанием РЗМ от 10 до 30 % масс. (рис. 4–6), причем необходимое содержание РЗМ в лигатуре достигалось корректировкой содержания фторидов РЗМ в технологической солевой смеси $KCl-NaCl-CaCl_2$.

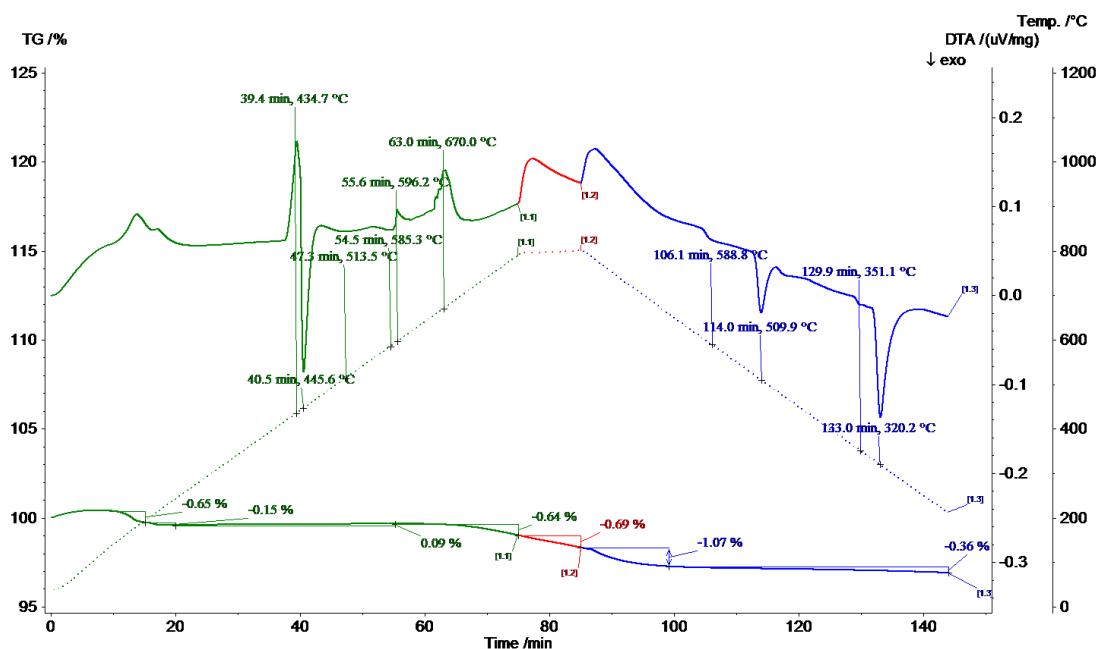


Рис. 3. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $Mg-Zn-YF_3-KCl-NaCl-CaCl_2$ в зависимости от времени при нагревании до $800^\circ C$

Fig. 3. Curves TG, DTA and T of the studied sample $Mg-Zn-YF_3-KCl-NaCl-CaCl_2$ as a function of time when heated to $800^\circ C$



Результаты синтеза лигатуры Mg-Zn-РЗМ
Results of Mg-Zn-REM master alloy synthesis

№ плавки	Отношение Mg/Zn	Фторид РЗМ	Извлечение, %	Фактический состав лигатуры, %		
				Mg	Zn	РЗМ
1	2:1	NdF_3	99,1	55,24	25,49	19,28
2	1:1	NdF_3	98,4	35,60	35,40	29,0
3	1:2	NdF_3	99,6	23,19	54,75	22,06
4	2:1	GdF_3	86,2	60,12	28,49	11,39
5	1:1	GdF_3	88,4	37,11	35,62	27,27
6	1:2	GdF_3	96,4	20,19	54,75	25,06
7	2:1	YF_3	40,4	62,12	29,49	8,39
8	1:1	YF_3	65,4	36,78	38,19	25,03
9	1:2	YF_3	97,2	28,34	56,03	15,63



a



b

Рис. 4. Лигатура Mg-Zn-Nd: а – слиток; б – излом
Fig. 4. Master alloy Mg-Zn-Nd: a – ingot; b – fracture



a



b

Рис. 5. Лигатура Mg-Zn-Gd: а – слиток; б – излом
Fig. 5. Master alloy Mg-Zn-Gd: a – ingot; b – fracture



a



b

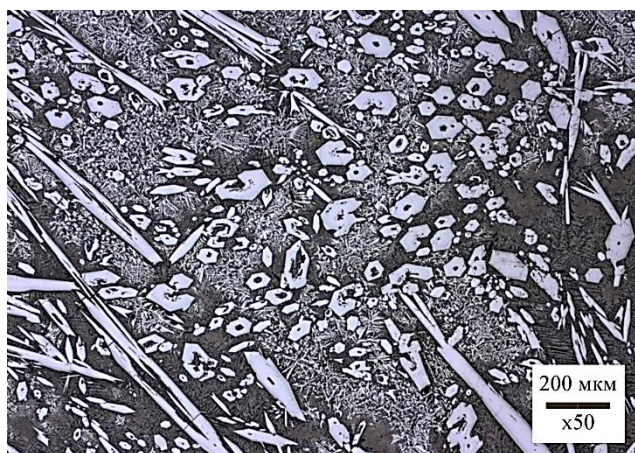
Рис. 6. Лигатура Mg-Zn-Y: а – слиток; б – излом
Fig. 6. Master alloy Mg-Zn-Y: a – ingot; b – fracture

В ходе экспериментов установлено, что добавка цинка к шихте способствует снижению температуры начала экзотермического эффекта восстановления РЗМ за счет того, что цинк при 450–500°C начинает активно взаимодействовать с магнием, образуя расплав, после чего начинается экзотермическая реакция восстановления РЗМ с образованием тройного соединения типа $Mg_xP3M_yZn_z$.

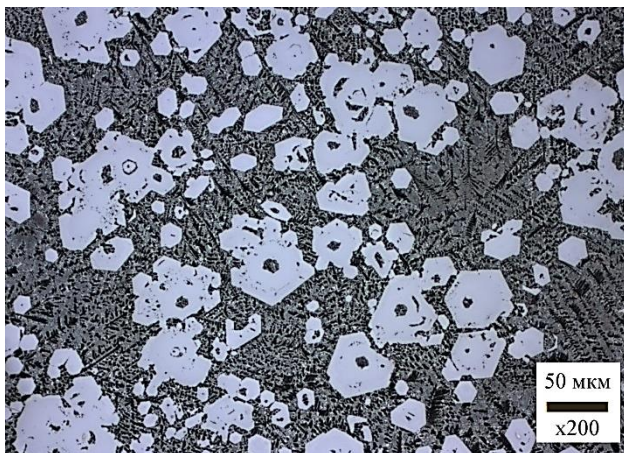
Максимальное извлечение неодима достигает 99,6%, гадолиния – 96,4%, иттрия – 97,2%. Полученные данные свидетельствуют о повышении степени восстановления гадолиния и иттрия при повышении содержания цинка в шихте. Лигатуры соответ-

ствуют содержанию основных контролируемых примесей, % масс., соответственно: кальций – 0,02, железо – 0,02, медь – 0,01, никель – 0,0025, кремний – 0,01.

Микроструктурный анализ полученных лигатур показал (рис. 7–9), что полученные лигатуры с неодимом и гадолинием имеют структуру твердого раствора с равномерным распределением по объему магниевой матрицы интерметаллидов $Mg_xP3M_yZn_z$. Количество интерметаллических соединений в лигатуре повышается по мере повышения содержания РЗМ. Микроструктура лигатуры магний-цинк-итрий характеризуется замкнутой сеткой, образующейся при содержании иттрия около 15%.

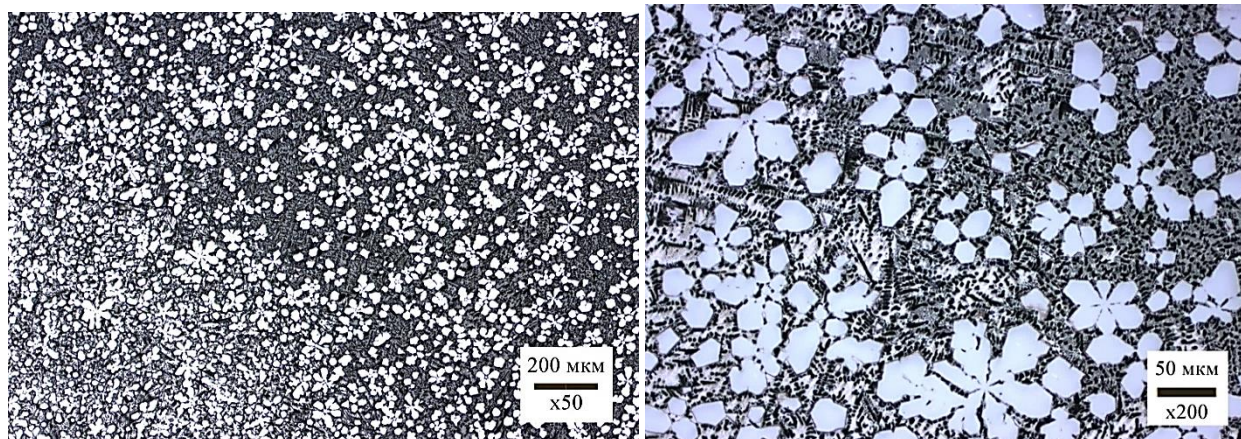


a



b

Рис. 7. Лигатура 25Mg-50Zn-25Nd: а – x50; б – x200
Fig. 7. Master alloy 25Mg-50Zn-25Nd: a – x50; b – x200

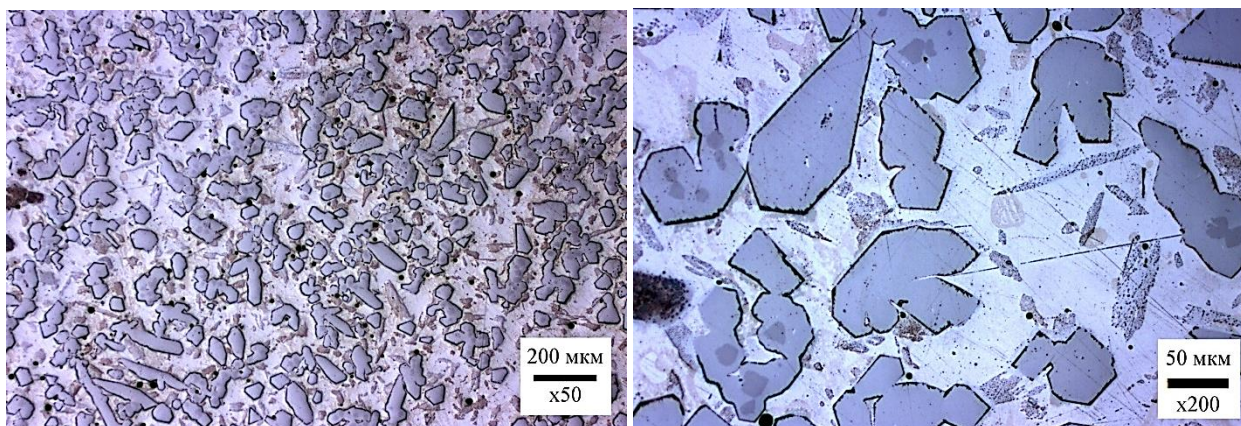


a

b

Рис. 8. Лигатура 25Mg-50Zn-25Gd: a – x50; b – x200

Fig. 8. Master alloy 25Mg-50Zn-25Gd: a – x50; b – x200



a

b

Рис. 9. Лигатура 35Mg-50Zn-15Y: a – x50; b – x200

Fig. 9. Master alloy 35Mg-50Zn-15Y: a – x50; b – x200

Заключение

Таким образом, в результате дифференциально-термического анализа определены температуры экзотермических и эндотермических эффектов при взаимодействии солевой смеси фторидов РЗМ-KCl-NaCl-CaCl₂ с магнием в присутствии цинка.

Выявлено, что оптимальные пределы отношения магния к цинку составляют 1:2, при этом затрачивается минимальное время на проведение реакции восстановления РЗМ из солевой смеси и обеспечиваются благоприятные условия для работы перемешивающих устройств. Содержание легирующего элемента в сплаве достигается предварительной корректировкой со-

держания исходного соединения фторида в технологической солевой смеси.

Доказано, что добавление цинка к шихте способствует повышению выхода иттрия и гадолиния в лигатуру, что может быть вызвано образованием соединений типа Mg_xРЗМ_yZn_z, при образовании которого выделяется значительное количество тепла.

Полученные экспериментальные данные являются предпосылкой для разработки технологии производства тройных РЗМ-содержащих лигатур на основе магния для использования в цветной и черной металлургии.



Библиографический список

1. Фролов А.В., И.Ю. Мухина, А.А. Леонов, З.П. Уридия Влияние легирования редкоземельными металлами на свойства и структуру литейного магниевого сплава экспериментального состава системы Mg-Zr-Zn-Y-Nd // Труды ВИАМ. 2016. № 3 (39). С. 23–29.
2. Каблов Е.Н., Волкова Е.Ф., Филонова Е.В. Влияние РЗЭ на фазовый состав и свойства нового жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 7. С. 19–26.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 212–222.
4. 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.
5. 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.
6. Белкин Г.И. Производство магний-циркониевых лигатур и сплавов. М.: Metallurgizdat, 2001. 146 с.
7. 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.
8. 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.
9. Кавалла Р., Бажин В.Ю. Изотропность свойств листовых заготовок из магниевых сплавов // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 828–832.
10. Косов Я.И., Бажин В.Ю. Синтез лигатуры алюминий-эрий из хлоридно-фторидных расплавов // Расплавы. 2018. № 1. С. 14–28.
11. Осинкина Т.В., Красиков С.А., Жилина Е.М., Агафонов С.Н., Ведмидь Л.Б., Жидовинова С.В. Влияние ниобия и тантала на особенности фазообразования при металлотермическом взаимодействии алюминия с диоксидом титана // Расплавы. 2018. № 5. С. 553–560.
12. Жилина Е.М., Красиков С.А., Агафонов С.Н. Расчет активности титана и циркония в алюмокальциевом оксидном расплаве // Расплавы. 2016. № 4. С. 300–306.
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. Zhiqiang Zhang, Xuan Liu, Wenyi Hu, Jiahao Li, Qichi Le, Lei Bao, Zhenjia Zhu, Jianzhong Cui. Microstructures, mechanical properties and corrosion behaviors of Mg-Y-Zn-Zr alloys with specific Y/Zn mole ratios // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 624. P. 116–125.
15. Савченков С.А. Анализ диаграмм плавкости итрийсодержащих галогенидных систем. Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 4 (58). С. 82–86.
16. Savchenkov S.A., Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Prospects of nanometallurgy application in the preparation of master alloys and composite materials. Smart Nanocomposites. 2015. Vol. 6. No. 2. 203 p.
17. Du B.N., Xiao Z.P., Qiao Y.X., Zheng L., Yu B.Y., Xu D.K., Sheng L.Y. Optimization of microstructure and mechanical property of a Mg-Zn-Y-Nd alloy by extrusion process // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 775. P. 990–1001.
18. Wang Jingfeng, Xie Feizhou, Liu Shijie, Huang Song, Pan Fusheng. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of As-Homogenized Mg-Gd-Y-Zn-Mn Alloy // Rare Metal Materials and Engineering. 2018. Vol. 47. Issue 6. P. 1700–1707.

References

1. Frolov A.V., I.Yu. Muhina, A.A. Leonov, Z.P. Uridiya. An influence of rare-earth metals doping on properties and structure of the experimental Mg-Zr-Zn-Y-Nd casting magnesium alloy. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 3, pp. 23–29. (In Russian)
2. Kablov E.N., Volkova E.F., Filonova E.V. Effect of REE on the phase composition and properties of new refractory magnesium alloy of the Mg - Zn - Zr - REE system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metals Science and Heat Treatment of Metals], 2017, no. 7, pp. 19–26. (In Russian)
3. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Yu. Application perspectives of magnesium and casting aluminium alloys. *Aviacionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 212–222. (In Russian)
4. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. Ways of improving the basic mechanical characteristics of magnesium deformable alloys. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10, pp. 2–12. (In Russian)
5. Duyunova 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* [Non-Ferrous Metal], 2013, no. 9, pp. 71–78. (In Russian)
6. Belkin G.I. *Proizvodstvo magnij-cirkonievyyh ligatur i splavov* [Production of magnesium-zirconium master alloys and alloys]. Moscow: Metallurgizdat Publ., 2001. 146 p.



7. 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.
8. 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.
9. Kavalla R., Bazhin V.Yu. Isotropy of magnesium alloy blank properties. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2016, vol. 222, pp. 828–832. (In Russian)
10. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Synthesis of aluminium-erbium master alloy from chloride-fluoride melts. *Raspilav* [Melts], 2018, no. 1, pp. 14–28. (In Russian)
11. Osinkina T.V., Krasikov S.A., Zhilina E.M., Agafonov S.N., Vedmid' L.B., Zhidovinova S.V. Influence of niobium and tantalum on peculiarities of phase formation at metallurgical interaction between aluminium and titanium dioxide. *Raspilav* [Melts], 2018, no 5, pp. 553–560. (In Russian)
12. Zhilina E.M., Krasikov S.A., Agafonov S.N. Calculation of titanium and zirconium activity in aluminocalcium oxide melt. *Raspilav* [Melts], 2016, no. 4, pp. 300–306. (In Russian)
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 Russian)

14. Zhiqiang Zhang, Xuan Liu, Wenyi Hu, Jiahao Li, Qichi Le, Lei Bao, Zhenjia Zhu, Jianzhong Cui. Microstructures, mechanical properties and corrosion behaviors of Mg–Y–Zn–Zr alloys with specific Y/Zn mole ratios. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 624, pp. 116–125.
15. Savchenkov S.A. Analysis of fusion diagrams of yttrium-containing halide systems. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, no. 4, pp. 82–86. (In Russian)
16. Savchenkov S.A., Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Prospects of nanometallurgy application in the preparation of master alloys and composite materials. *Smart Nanocomposites*, 2015, vol. 6, no. 2, 203 p.
17. B.N.Du, Z.P.Xiao, Y.X.Qiao, L.Zheng, B.Y.Yu, D.K.Xu, L.Y.Sheng. Optimization of microstructure and mechanical property of a Mg–Zn–Y–Nd alloy by extrusion process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 775, pp. 990–1001.
18. Wang Jingfeng, Xie Feizhou, Liu Shijie, Huang Song, Pan Fusheng. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of As-Homogenized Mg–Gd–Y–Zn–Mn Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, vol. 47, Issue 6, pp. 1700–1707.

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.

Authorship criteria

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савченков Сергей Анатольевич, аспирант,
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru
Уголков Валерий Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследований наноструктур,
e-mail: ugovkov.52@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Savchenkov, Postgraduate,
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru
Valery L. Ugolkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher Laboratory of the Nanostructure Research,
e-mail: ugovkov.52@mail.ru