

## Особенности процесса получения лигатур Mg-Zn-Y методом металлотермического восстановления расплава фторида иттрия

С.А. САВЧЕНКОВ, И.И. БЕЛОГЛАЗОВ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ beloglazov\_ii@pers.spmi.ru; ☎ +7-921-778-5984

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Savchenkov, S.; Beloglazov, I. Features of the Process Obtaining of Mg-Zn-Y Master Alloy by the Metallothermic Recovery Method of Yttrium Fluoride Melt. Crystals 2022, 12, 771. <https://doi.org/10.3390/cryst12060771>

**Аннотация:** В настоящее время для производства сплавов магния и алюминия используются магниевые лигатуры с таким редкоземельным металлом (РЗМ), как иттрий. Эти сплавы, особенно система Mg-6Zn-1Y-0,5Zr, широко используются в авиационной и автомобильной промышленности. Статья посвящена исследованию особенностей процесса синтеза тройных сплавов магния с иттрием и цинком. Авторы использовали рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), дифференциальный термический анализ (ДТА) и рентгеноспектральный анализ (РСА). Для проведения микроструктурных исследований использовалась оптическая микроскопия. Исследованы тепловые эффекты, возникающие в ходе металлотермических реакций восстановления иттрия из солевой смеси  $YF_3-NaCl-KCl-CaCl_2$  расплавом магния и цинка, и определены температуры этих эффектов. Подтверждено, что металлотермическая реакция восстановления иттрия протекает из прекурсоров состава:  $Na_{1.5}Y_{2.5}F_9$ ,  $NaYF_4$ ,  $Na_5Y_9F_{32}$  и  $KY_7F_{22}$ , и начинается при температуре 471°C. Подробно представлены результаты экспериментальных исследований процесса металлотермического восстановления иттрия из солевой смеси  $YF_3-NaCl-KCl-CaCl_2$ . Эксперименты проводились в шахтной печи при температурах от 650 до 700°C, и было установлено, что при температуре синтеза 700°C выход иттрия достигает 99,1-99,8%. Установлены рациональные технологические режимы синтеза (температура 700°C, выдержка в течение 25 мин, соотношение хлоридов и фторида иттрия 6:1, периодическое перемешивание расплавленного металла), при которых выход иттрия достигает 99,8%. В ходе экспериментов была изучена структура полученных образцов сплава. Эта структура отличается равномерным распределением тройных интерметаллических соединений ( $Mg_3YZn_6$ ) в основной части двойной магниевое-цинковой эвтектики. Проведены исследования по испытанию полученного тройного мастер-сплава в качестве легирующего материала при производстве сплавов системы Mg-6Zn-1Y-0,5Zr, при этом усвояемость иттрия составила от 91 до 95%.

**Ключевые слова:** редкоземельные металлы; магниевый сплав; сплав магний-иттрий; синтез сплава; мастер-сплав; жаропрочные сплавы; магний; металлотермическое восстановление.

## Features of the Process Obtaining of Mg-Zn-Y Master Alloy by the Metallothermic Recovery Method of Yttrium Fluoride Melt

Sergey A. SAVCHENKOV and Iliia I. BELOGLAZOV ✉

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ beloglazov\_ii@pers.spmi.ru; ☎ +7-921-778-5984

**Abstract:** At present, magnesium master alloys with such rare earth metals (REM) as yttrium are used in the production of alloys of magnesium and aluminum. These alloys especially the system Mg-6Zn-1Y-0,5Zr are commonly used in the aircraft and automotive industries. The article is devoted to the exploration of the synthesis process features for ternary magnesium master alloys with yttrium and zinc. The authors used X-ray fluorescence analysis (XRF), differential thermal analysis (DTA), and X-ray spectral analysis (XRD). Optical microscopy was used to conduct microstructural studies. The thermal effects that occur during metallothermic reactions of yttrium reduction from the  $YF_3-NaCl-KCl-CaCl_2$  salt mixture with a melt of magnesium and zinc were investigated, and the temperatures of these effects were determined. It has been confirmed that the metallothermic reaction of yttrium reduction proceeds from the precursors of the composition:  $Na_{1.5}Y_{2.5}F_9$ ,  $NaYF_4$ ,  $Na_5Y_9F_{32}$ , and  $KY_7F_{22}$ , and starts at a temperature of 471°C. The results of experimental studies of the process of metallothermic reduction of yttrium from the salt mixture  $YF_3-NaCl-KCl-CaCl_2$  are presented in detail. These experiments were carried out in a pit furnace at temperatures ranging from 650 to 700°C, and it was found that, at a synthesis temperature of 700°C, the yttrium yield is up to 99.1–99.8%. The paper establishes rational technological regimes for the synthesis (temperature 700°C, exposure for 25 min, the ratio of chlorides to yttrium fluoride 6:1, periodic stirring of the molten metal) at which the yttrium yield reaches up to 99.8%. The structure of the master alloy samples obtained during the experiments was studied. That structure can be distinguished by a uniform distribution of ternary intermetallic compounds ( $Mg_3YZn_6$ ) in the bulk of the double magnesium–zinc eutectic. Studies have been carried out on testing the obtained ternary master alloy as an alloying material in the production of alloys of the Mg-6Zn-1Y-0.5Zr system, while the digestibility of yttrium ranged from 91 to 95%.

**Keywords:** rare earth metals; alloy synthesis; master alloy; magnesium alloy; magnesium–yttrium alloy; heat-resistant alloys; magnesium; metallothermic reduction.

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

## 1. Введение

Иттрий имеет атомный радиус 0,18012 нм, максимальная растворимость в твердом магнии составляет 3,6 мас. %. Он активно используется в качестве легирующей добавки в литых и деформируемых магниевых сплавах, в частности, в сплавах марок МЛ-19 и ИМВ7-1, а также в смесях MgZn-Y, Mg-Sn-Zn-Y, Mg-Y-Mn, Mg-Y-Gd-Ca и других [1-6]. Ранее было установлено, что легирование магниевых сплавов иттрием влияет на измельчение зерна, при этом добавка иттрия в магниевый сплав в количестве до 5,0 мас. % уменьшает средний размер зерна магния до 33,62 мкм.

Эффективность использования РЗМ для легирования магниевых и алюминиевых сплавов [7-11], в частности иттрия, доказана давно. Однако исследования, направленные на улучшение свойств сплавов магний-иттрий, продолжаются и по сей день учеными из разных стран мира [12-19]. Кроме того, цинк является одной из широко используемых легирующих добавок в магниевых сплавах и вводится для повышения прочности как литых, так и деформируемых магниевых сплавов. Цинк с РЗМ обычно используется в магниевых сплавах различных марок. Такие добавки вводятся для повышения эффективности термической обработки, благодаря чему значительно повышаются предел текучести и сопротивление ползучести сплава. [20, 21].

Получение сплавов на основе легких металлов с улучшенными механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками в большей степени зависит от вида и качества используемых основных сплавов [22-26], так как их добавка и последующая ассимиляция определяют микроструктурное строение как сплавов, так и литых изделий и слитков [27-29]. Актуальность использования таких сплавов заключается в низкой скорости растворения и ассимиляции чистых тугоплавких компонентов в магниевом расплаве. Также она заключается в высокой степени ассимиляции легкоокисляемых компонентов сплава [30]. Установлено, что основным методом получения литейных сплавов является метод прямого легирования, который характеризуется высокими температурами, что, соответственно, приводит к большим безвозвратным потерям легирующих элементов. В связи с этим авторы проводят исследования по получению двойных и тройных маточных сплавов из их соединений методом металлотермического восстановления РЗМ. В конечном итоге присутствие цинка в составе тройных маточных сплавов обеспечивает снижение температур плавления, а также повышает растворимость тугоплавких легирующих элементов.

Добавка РЗМ в виде тройных мастер-сплавов с магнием и цинком может быть эффективно реализована при производстве сплавов. В частности, она может быть использована для сплавов на основе магния и алюминия, поскольку в состав большого количества систем магний-иттрий-содержащих сплавов входит цинк, вводимый для повышения прочности [31-36]. Кроме того, его присутствие в составе тройных эталонных сплавов обеспечивает снижение их температур плавления, а также обеспечивает более высокую растворимость в них тугоплавких элементов [36]. Следует отметить, что магний и его сплавы воспламеняются при нагреве на воздухе при температурах выше 500°C, при этом горение магния сопровождается выделением большого количества тепла. Для предотвращения воспламенения магния при синтезе основных сплавов в промышленности используются флюсы различного химического состава. Известно, что состав технологической солевой смеси (флюса), а именно ее агрегатное состояние и термическая стабильность, оказывают непосредственное влияние на технологические параметры процесса получения маточных сплавов на основе магния [37, 38]. В данной работе, исходя из известных данных [37], в качестве основы была выбрана солевая смесь состава 35KCl-35NaCl-30CaCl<sub>2</sub>. В этот флюс был добавлен новый компонент – фторид иттрия для образования комплексных соединений, являющихся прекурсорами при получении тройных эталонных сплавов Mg-Zn-Y. На основании предыдущих исследований [36-38] важно подчеркнуть, что использование флюсов при плавке магниевых сплавов не снижает их коррозионную стойкость при дальнейших операциях.

В связи с утверждением Стратегии развития металлургической промышленности России на период до 2030 года [39] задача получения магниевых мастер-сплавов нового состава для отечественной магниевой промышленности приобретает повышенный приоритет. Согласно этому документу, необходимо увеличить производство металлургической продукции с высокой добавленной стоимостью. Кроме того, для повышения эффективности переработки минерального сырья государству крайне важно стимулировать российские металлургические компании к повышению технического уровня производства [40-47]. В связи с этим целью исследования являлось изучение особенностей процесса получения тройных маточных сплавов (Mg-Zn-Y) с выявлением технологических условий их получения.

## 2. Материалы и методы

Термический анализ проводили на установке STA 429 CD (NETZSCH, Selb, Германия) в алундовом плавильном тигле с крышками, в потоке аргона, при скорости нагрева  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до температуры  $780^{\circ}\text{C}$ .

Исследования магниевого термического восстановления фторида иттрия из расплавленных солей в присутствии цинка проводились при переменном времени процесса синтеза, от 15 до 25 мин, и температуре синтеза от  $650$  до  $700^{\circ}\text{C}$ . Постоянное соотношение магния и цинка (Mg:Zn) составляло 1:2, переменное соотношение фторида иттрия и хлоридов – 1:6. Для проведения экспериментальных исследований была разработана следующая методика. Сначала готовили флюс состава  $\text{YF}_3 + (35\text{NaCl} - 35\text{KCl} - 30\text{CaCl}_2 \text{ масс. \%})$ . Затем его перемешивали в лабораторном миксере и загружали в плавильный тигель вместе со слитком магния и гранулированным цинком. Его устанавливали в муфельную печь, нагретую до заданной температуры. Процесс синтеза проводился путем выдерживания плавильного тигля в печи при заданных температуре и времени в двух режимах: с периодическим перемешиванием расплава и без перемешивания. После окончания реакции экзотермического восстановления иттрия расплав отстаивали. Затем отработанный солевой расплав, в основном его поверхностную часть, сливали. Затем мастер-сплав заливали в формы. В ходе экспериментов массовое соотношение компонентов солевой смеси  $35\text{NaCl} - 35\text{KCl} - 30\text{CaCl}_2$  поддерживалось постоянным. Фторид иттрия добавляли при соблюдении массового соотношения хлоридов и  $\text{YF}_3$  в смеси 6:1. Необходимое количество иттрия в сплаве достигалось изменением количества магния и цинка при восстановлении фторида иттрия из солевого расплава. Было проведено три параллельных эксперимента, результаты которых показывают средние значения степени извлечения иттрия.

С помощью спектрометра XRF-1800 (Shimadzu, Киото, Япония) был проведен элементный анализ образцов мастер-сплавов, полученных в ходе экспериментов.

Фазы отработанной солевой смеси определяли с помощью дифрактометра XRD-7000 (Шимадзу, Киото, Япония). Металлографические исследования образцов полученных эталонных сплавов проводили на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT фирмы Карл Цейс (Оберкохен, Германия).

## 3. Результаты исследований и их обсуждение

Для понимания этапов процесса синтеза тройного мастер-сплава из хлоридно-фторидного расплава состава  $\text{YF}_3:(\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{CaCl}_2)$  (1:6) были определены фазы предварительно расплавленной солевой смеси данного состава. Это показало, что при плавлении солевой смеси  $\text{YF}_3$  взаимодействует с хлоридами калия и натрия, образуя комплексные соединения состава:  $\text{KY}_7\text{F}_{22}$ ,  $\text{NaYF}_4$ ,  $\text{Na}_{1.5}\text{Y}_{2.5}\text{F}_9$  и  $\text{Na}_5\text{Y}_9\text{F}_{32}$ , которые, в свою очередь, являются прекурсорами при получении тернарного мастер-сплава с образованием интерметаллических соединений  $\text{Mg}_x\text{Y}_y\text{Zn}_z$ . На рис. 1 представлена рентгенограмма солевой смеси после плавления, а на рис. 2 – рентгенограмма солевой смеси после отделения водорастворимых хлоридов.

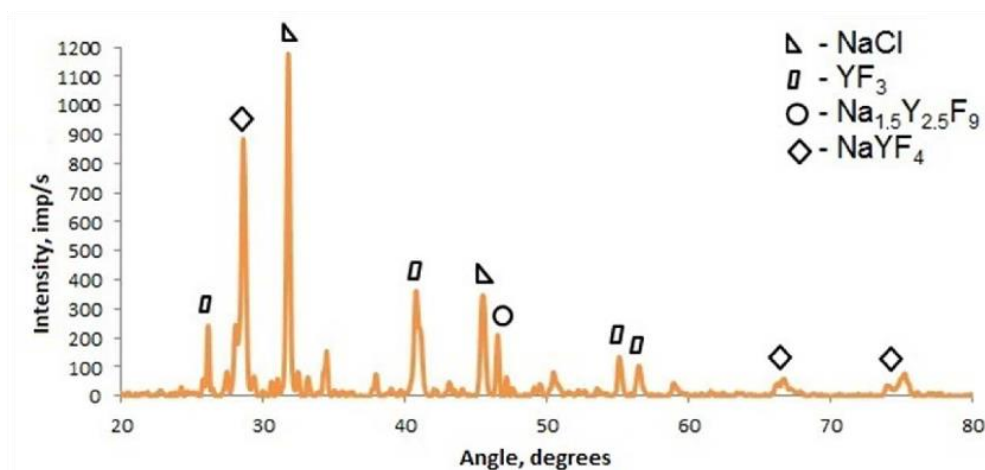


Рис. 1. Рентгеновская картина расплавленной солевой смеси  $\text{YF}_3 - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{CaCl}_2$  после плавления

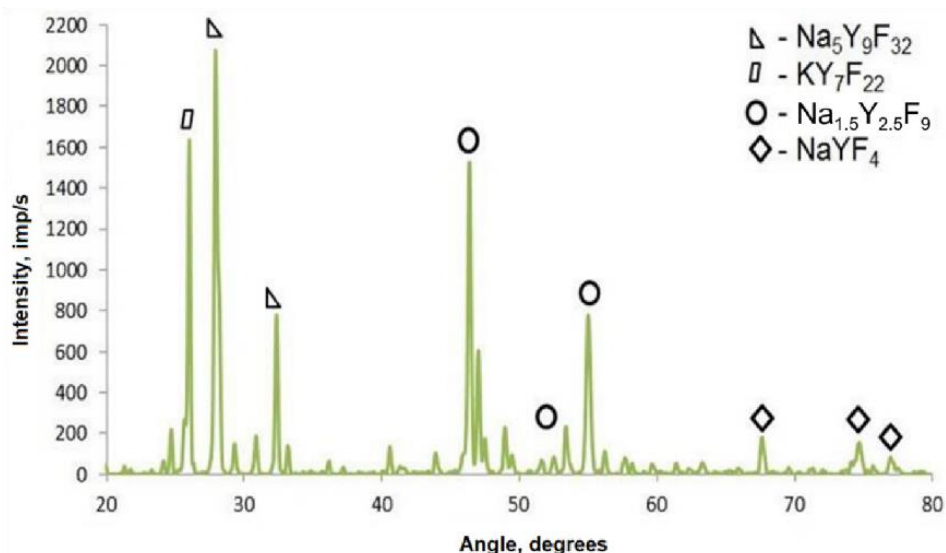


Рис. 2. Рентгенограмма расплавленной солевой смеси  $\text{YF}_3\text{-NaCl-KCl-CaCl}_2$  после отделения хлоридов.

На следующем этапе был проведен термический анализ синтеза мастер-сплава заданного состава, в присутствии магния и цинка, из технологической солевой смеси  $\text{YF}_3:(\text{NaCl-KCl-CaCl}_2)$  (6:1), был проведен термический анализ. На рисунке 3 представлена термограмма, полученная при нагревании смеси  $\text{YF}_3\text{-NaCl-KCl-CaCl}_2$  с магнием и цинком.

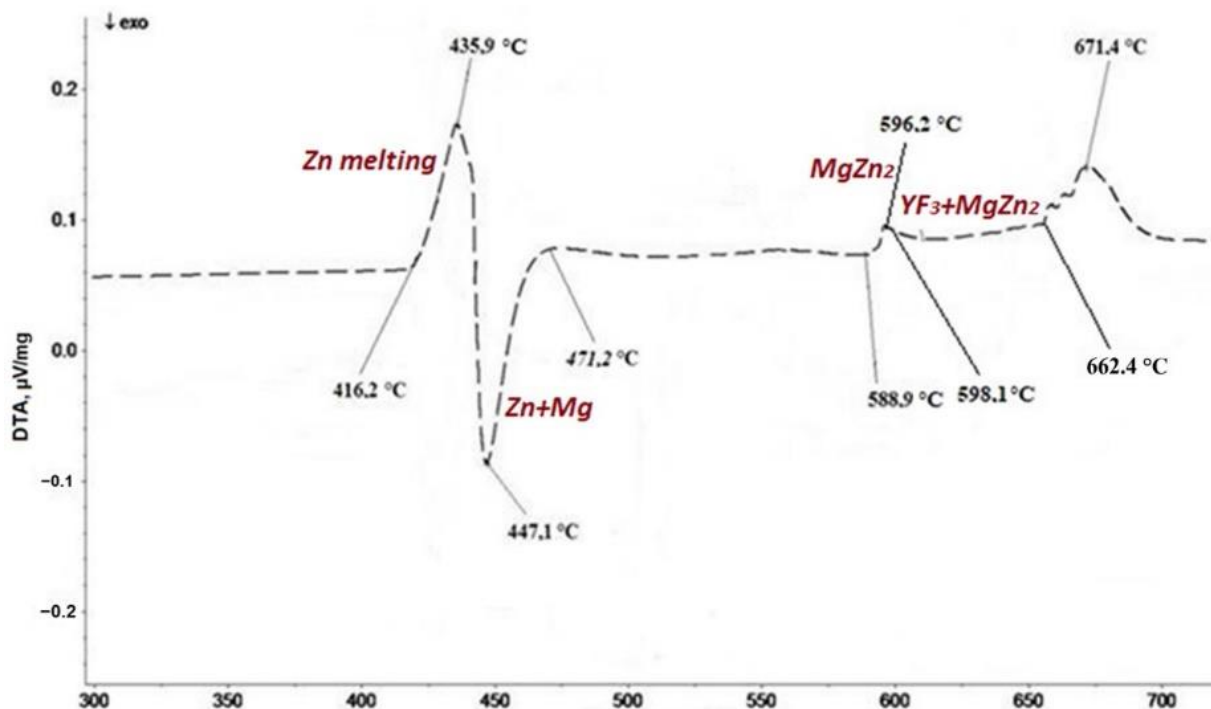


Рис. 3. Кривая ДТА плавления смеси  $\text{YF}_3\text{-NaCl-KCl-CaCl}_2$  с магнием и цинком при нагревании до  $780^\circ\text{C}$

Установлено, что эндотермический эффект, формирующийся при температуре  $416,2^\circ\text{C}$  и имеющий высшую точку при  $435,9^\circ\text{C}$ , совпадает с плавлением самого низкоплавкого элемента в данной системе, а именно гранулированного цинка, имеющего температуру плавления  $419,6^\circ\text{C}$ . После этого расплавленный цинк начинает активно взаимодействовать с магниевым слитком ( $2\text{Zn} + \text{Mg} = \text{MgZn}_2$ ), что подтверждается экзотермическим эффектом с минимумом при температуре  $447,1^\circ\text{C}$ , который заканчивается при  $471,2^\circ\text{C}$ . При достижении температуры  $471,2^\circ\text{C}$  на термограмме обнаруживается экзотермический эффект с небольшим перегибом, который заканчивается при температуре  $588,9^\circ\text{C}$  и прерывается плавлением, скорее всего, двойного интерметаллического соединения

$MgZn_2$ , с эндотермическим эффектом и максимумом при температуре  $596,2^{\circ}C$  [48]. После этого в интервале от  $598,1$  до  $662,2^{\circ}C$  обнаруживается еще один экзотермический эффект. Выявленные экзотермические эффекты свидетельствуют о протекании экзотермической реакции восстановления  $YF_3$  ( $YF_3 + MgZn_2 = Mg_xZn_yY_z + MgF_2$ ) из смеси соли с магнием-цинковым расплавом, что подтверждается составом Mg-Zn-Y, полученным после анализа металлического шарика.

На следующем этапе экспериментов основной задачей было определение оптимальных технологических параметров плавки, позволяющих достичь более высокого выхода иттрия для основного сплава. Результаты проведенных исследований, проведенных экспериментов и исходные данные по получению тройного мастер-сплава приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по получению эталонного сплава Mg-Zn-Y

| Расплав №. | Соотношение $YF_3$ :хлориды | T, °C | t, мин | Перемешивание | Восстановление Y, % |
|------------|-----------------------------|-------|--------|---------------|---------------------|
| 1          | 1:4                         | 650   | 15     | нет           | 87,1                |
| 2          | 1:6                         | 650   | 15     | нет           | 96,2                |
| 3          | 1:4                         | 700   | 15     | да            | 87,8                |
| 4          | 1:6                         | 700   | 15     | да            | 99,1                |
| 5          | 1:4                         | 650   | 25     | да            | 86,4                |
| 6          | 1:6                         | 650   | 25     | да            | 94,2                |
| 7          | 1:4                         | 700   | 25     | нет           | 89,1                |
| 8          | 1:6                         | 700   | 25     | нет           | 98,3                |
| 9          | 1:4                         | 650   | 15     | да            | 86,2                |
| 10         | 1:6                         | 650   | 15     | да            | 99,6                |
| 11         | 1:4                         | 700   | 15     | нет           | 88,2                |
| 12         | 1:6                         | 700   | 15     | нет           | 94,4                |
| 13         | 1:4                         | 650   | 25     | нет           | 86,3                |
| 14         | 1:6                         | 650   | 25     | нет           | 95,1                |
| 15         | 1:4                         | 700   | 25     | да            | 89,1                |
| 16         | 1:6                         | 700   | 25     | да            | 99,8                |

Установлено, что результатом экзотермических реакций восстановления иттрия из полученной солевой смеси ( $YF_3-NaCl-KCl-CaCl_2$ ) магниевым-цинковым расплавом является получение тройного основного сплава магний-цинк-иттрий. По экспериментальным данным установлено, что при увеличении соотношения  $YF_3$  и хлоридов до 1:6 в технологической солевой смеси выход иттрия увеличивается до 99,8 %. При увеличении температуры до  $700^{\circ}C$  существенных изменений в выходе иттрия не произошло. Основным результатом исследования стало получение тройных мастер-сплавов с содержанием Y 25 % масс. и чистой поверхностью без неметаллических включений и газовых пор. Макроснимки были сделаны на фотоаппарат Canon 60D и макрообъектив Canon 100 mm f/2.8 (Токио, Япония) (рис. 4).



Рис. 4. Макроструктура лигатуры Mg-Zn-Y: (a) 5×; (b) 5,5×

Требований и стандартов на тройные эталонные сплавы исследуемого состава не существует, поэтому для сравнения содержания примесей за основу был взят перечень требований к лигатуре магний-неодим. Эта лигатура также используется при производстве жаропрочных магниевых сплавов. Согласно ТУ 48-4-271-91, по содержанию примесей эталонный сплав Mg-Zn-Y соответствует требованиям, предъявляемым к магниевым лигатурам Mg-Nd (марка MN) (табл. 2).

Таблица 2

Элементный состав маточного сплава 25Mg-50Zn-25Y (ТУ 48-4-271-91)

| Состав  | Норма                |        |       |                   |        |      |          |         |
|---------|----------------------|--------|-------|-------------------|--------|------|----------|---------|
|         | Массовая доля, %     |        |       |                   |        |      |          |         |
|         | Основных компонентов |        |       | Примесей не более |        |      |          |         |
|         | Цинк                 | Магний | РЗМ   | Железо            | Никель | Медь | Алюминий | Кремний |
| Mg-Nd   | -                    | основа | 20-35 | 0,15              | 0,01   | 0,1  | 0,05     | 0,05    |
| Mg-Zn-Y | основа               | 25,6   | 23,9  | 0,09              | -      | 0,05 | 0,03     | 0,04    |

Микроструктурные исследования показывают, что полученные образцы мастер-сплава магний-цинк-иттрий характеризуются структурой, включающей двойную магний-цинковую эвтектику и равномерно распределенные интерметаллические соединения состава  $Mg_3YZn_6$  [49]. На рисунке 5 приведены типичные изображения микроструктур мастер-сплава магний-цинк-иттрий, полученного термическим восстановлением магнием хлоридно-фторидного расплава.

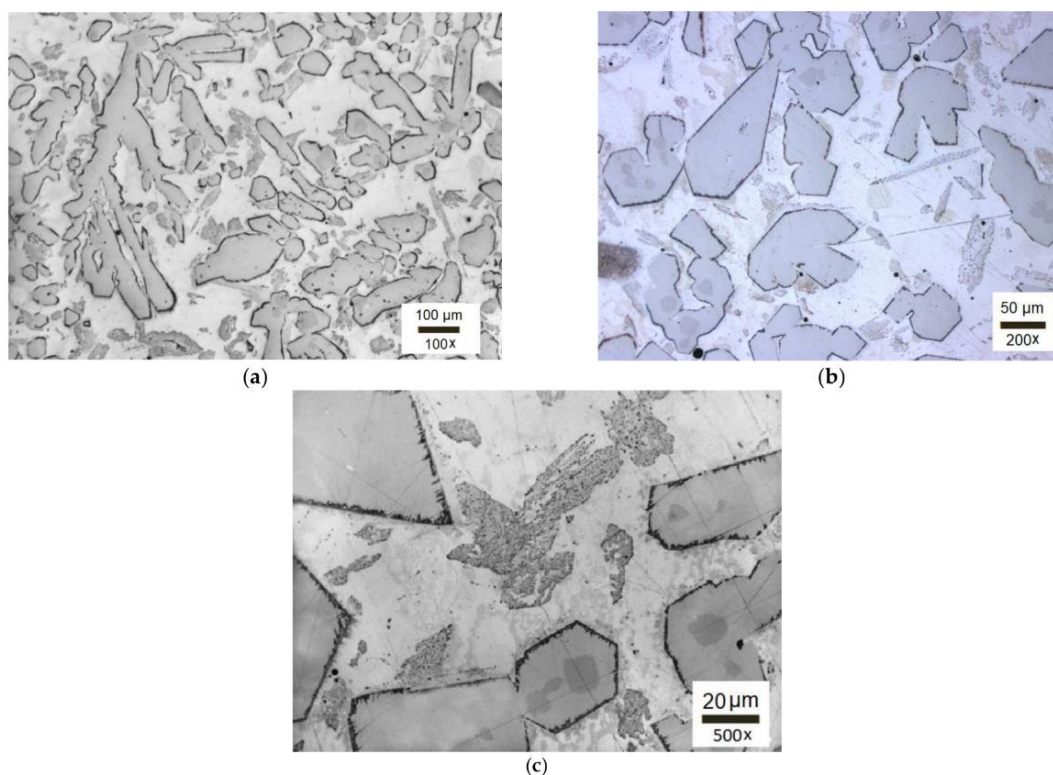


Рис. 5. Микроструктура мастер-сплава 25Mg-50Zn-25Y; (а) 100×, (б) 200×, (в) 500×

На заключительном этапе полученный тернарный мастер-сплав был испытан в качестве легирующего материала, что было осуществлено при получении сплава системы Mg-6Zn-1Y-0,5Zr в муфельной печи. Термообработка полученных сплавов, а также дальнейшие испытания на данном этапе не проводились. Усвоение иттрия в процессе получения сплава составило от 94 до 98 %, а структура полученного сплава представляет собой типичную для магниевых сплавов микроструктуру, которая характеризуется однородностью и размером зерна, равным в среднем 52,4 мкм (рис. 6).

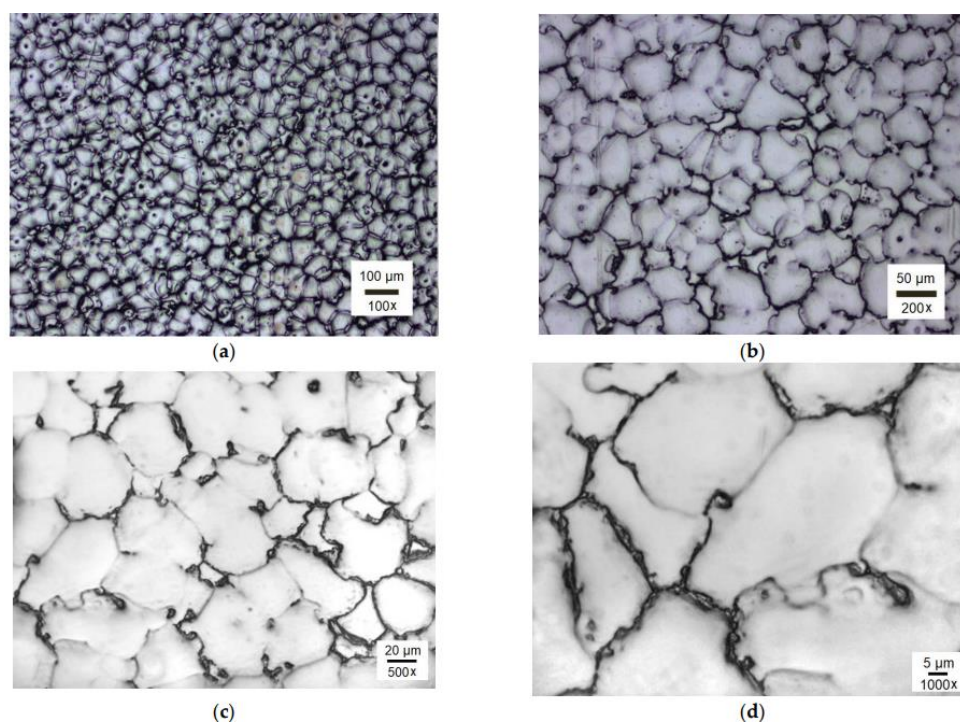


Рис. 6. Микроструктура сплава Mg-6Zn-1Y-0,5Zr в мас. %; (a) 100×, (b) 200×, (c) 500×, (d) 1000×

#### 4. Выводы

Проведены экспериментальные исследования, в результате которых получен тройной сплав магний-цинк-иттрий и разработаны технологические решения, обеспечивающие высокое извлечение иттрия (до 99,8 %) в тройной сплав Mg-Zn-Y из фторида в процессе металлотермического восстановления. Выявлены рациональные технологические режимы синтеза (температура 700°C, время выдержки 25 мин, соотношение фторидов иттрия и хлоридов 1:6, периодическое перемешивание расплава), при которых достигается высокая степень извлечения иттрия.

С помощью дифференциального термического анализа определены начальная и конечная точки реакции восстановления иттрия с магний-цинковым расплавом из его фторида в хлоридном расплаве: она протекает при температуре 471°C, а затем подтверждается экзотермическим эффектом, который заканчивается при температуре 588,9°C.

Структура полученных образцов отличается равномерным распределением тройных интерметаллических соединений ( $Mg_3YZn_6$ ) в основной части двойной магниево-цинковой эвтектики.

Проведено детальное исследование по испытанию полученного тройного мастер-сплава в качестве легирующего материала при производстве сплавов системы Mg-6Zn-1Y-0,5Zr, при этом усвояемость иттрия варьировалась от 94 до 98 %.

Полученные данные могут быть положены в основу разработки промышленной технологии производства магний-цинк-иттриевых сплавов, а также разработки стандартов на их применение в цветной и черной металлургии.

**Вклад авторов:** концептуализация, И.Б.; методология, С.С.; программное обеспечение, И.Б.; валидация, С.С., И.Б.; исследование, И.Б.; ресурсы, С.С.; написание – подготовка первоначального варианта, С.С.; написание – рецензирование и редактирование, И.Б.; визуализация, И.Б.; управление проектом, И.Б.; получение финансирования, И.Б. Все авторы прочитали и согласились с опубликованным вариантом рукописи.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Заявление Совета по институциональному надзору:** не применимо.

**Заявление об информированном согласии:** не применимо.

**Заявление о доступности данных:** не применимо.

**Благодарности:** авторы благодарят Санкт-Петербургский горный университет за предоставленную возможность проведения лабораторных экспериментов. Исследования проводились с использованием оборудования Научного центра «Вопросы переработки минеральных и техногенных ресурсов» и Учебно-научного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

**Конфликты интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Rokhlin, L.L.; Lukyanova, E.A.; Dobatkina, T.V.; Tarytina, I.E.; Korolkova, I.G. Effect of Rare-Earth Metals (Dy, Tb, Sm, Nd) on Structure and Mechanical Properties of the Mg-Y-Gd-Zr System Alloys. Available online: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2017/7/373> (accessed on 16 May 2022).
2. Wang, J.; Li, Y.; Xu, R. The thermal stability and activation energy of the nanocrystalline Mg-Zn-Y alloy obtained by high pressure torsion. *Mater. Lett.* 2020, 268, 127607. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127607>
3. Chen, Y.; Wang, Y.; Gao, J. Microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Sn-Zn-Y alloys. *J. Alloy. Compd.* 2018, 740, 727–734. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.192>
4. Volkova, E.F.; Duyunova, V.A.; Mostyaev, I.V.; Akinina, M.V. Regularities of the formation and features of the influence of a fine structure on the properties of a new-generation magnesium alloy. *J. «Almaz—Antey» Air Space Def. Corp.* 2020, 55–63. <http://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-55-63>
5. Dvorsky, D.; Kubasek, J.; Vojtech, D.; Minarik, P. Novel aircraft Mg-Y-Gd-Ca alloys with high ignition temperature and suppressed flammability. *Mater. Lett.* 2020, 264, 127313. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127313>
6. Niu, R.L.; Yan, F.J.; Duan, D.P.; Yang, X.M. Effect of yttrium addition on microstructures, damping properties and mechanical properties of as-cast Mg-based ternary alloys. *J. Alloy. Compd.* 2019, 785, 1270–1278. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.287>
7. Aryshenskii, E.; Lapshov, M.; Hirsch, J.; Konovalov, S.; Bazhenov, V.; Drits, A.; Zaitsev, D. Influence of the small sc and zr additions on the as-cast microstructure of al-mg-si alloys with excess silicon. *Metals* 2021, 11, 1797. <http://doi.org/10.3390/met11111797>
8. Yashin, V.V.; Aryshensky, E.V.; Drits, A.M.; Latushkin, I.A. Effect of hafnium transition metal additives on the microstructure of 01570 aluminum alloy. *Tsvetnye Met.* 2020, 2020, 84–90.
9. Belov, N.A.; Akopyan, T.K.; Korotkova, N.O.; Naumova, E.A.; Pesin, A.M.; Letyagin, N.V. Structure and Properties of Al-Ca(Fe, Si, Zr, Sc) Wire Alloy Manufactured from As-Cast Billet. *JOM* 2020, 72, 3760–3768. <http://doi.org/10.1007/s11837-020-04342-x>
10. Akopyan, T.K.; Letyagin, N.V.; Belov, N.A.; Shurkin, P.K. New eutectic type Al alloys based on the Al-Ca-La(-Zr, Sc) system. *Mater. Today: Proc.* 2019, 19, 2009–2012. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.062>
11. Deev, V.; Prusov, E.; Shurkin, P.; Ri, E.; Smetanyuk, S.; Chen, X.; Konovalov, S. Effect of La addition on solidification behavior and phase composition of cast Al-Mg-Si Alloy. *Metals* 2020, 10, 1673. <http://doi.org/10.3390/met10121673>
12. Liu, L.L.; Sun, W. A kind of sandwich-combined precipitate formed in a duplex-aged Mg-Gd-Y alloy. *Mater. Lett.* 2021, 285, 129099. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129099>
13. Baek, S.M.; Lee, S.Y.; Kim, J.C.; Kwon, J.; Jung, H.; Lee, S.; Lee, K.S.; Park, S.S. Role of trace additions of Mn and Y in improving the corrosion resistance of Mg-3Al-1Zn alloy. *Corros. Sci.* 2021, 178, 108998. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108998>
14. Chen, J.; Tan, L.; Yu, X.; Yang, K. Effect of minor content of Gd on the mechanical and degradable properties of as-cast Mg-2Zn-xGd-0.5Zr alloys. *J. Mater. Sci. Technol.* 2019, 35, 503–511. <http://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.022>
15. Liu, J.; Yang, L.; Zhang, C.; Zhang, B.; Zhang, T.; Li, Y.; Wu, K.; Wang, F. Role of the LPSO structure in the improvement of corrosion resistance of Mg-Gd-Zn-Zr alloys. *J. Alloy. Compd.* 2019, 782, 648–658. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.233>
16. Luk'yanova, E.A.; Rokhlin, L.L.; Dobatkina, T.V.; Korol'kova, I.G.; Tarytina, I.E. Effect of Samarium on the Properties of Mg-Y-Gd-Zr Alloys. *Russ. Metall.* 2018, 2018, 51–55. <http://doi.org/10.1134/S0036029518010081>
17. Rokhlin, L.L.; Dobatkina, T.V.; Luk'yanova, E.A.; Tarytina, I.E.; Temralieva, D.R. Effect of Holmium and Ytterbium on Age Hardening of High-Strength Magnesium Alloy IMV7-1 of the Mg-Y-Gd-Zr System. *Met. Sci. Heat Treat.* 2019, 61, 428–433. <http://doi.org/10.1007/s11041-019-00443-w>
18. Guobing, W.; Xiaodong, P.; Junchen, L.; Weidong, X.; Qunyi, W. Structure heredity effect of Mg-10Y master alloy in AZ31 magnesium alloy. *Rare Met. Mater. Eng.* 2013, 42, 2009–2013. [http://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60016-3](http://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60016-3)
19. Zhang, J.; Liu, S.; Wu, R.; Hou, L.; Zhang, M. Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems. *J. Magnes. Alloy.* 2018, 6, 277–291. <http://doi.org/10.1016/j.jma.2018.08.001>
20. Zhou, L.; Huang, Y.D.; Mao, P.L.; Kainer, K.U.; Liu, Z.; Hort, N. Influence of composition on hot tearing in binary mg-zn alloys. *Int. J. Cast Met. Res.* 2011, 24, 170–176. <http://doi.org/10.1179/136404611X13001912813942>
21. Cheremisina, O.V.; Cheremisina, E.; Ponomareva, M.A.; Fedorov, A. Sorption of rare earth coordination compounds. *J. Min. Inst.* 2020, 244, 474–481. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.10>
22. Peng, X.; Li, J.; Xie, S.; Wei, G.; Yang, Y. Effects of different state Mg-5Sr-10Y master alloys on the microstructure refinement of AZ31 magnesium alloy. *Rare Met. Mater. Eng.* 2013, 42, 2421–2426. [http://doi.org/10.1016/s1875-5372\(14\)60031-x](http://doi.org/10.1016/s1875-5372(14)60031-x)
23. Skachkov, V.M.; Yatsenko, S.P. Obtaining of Sc, Zr, Hf and Y base metals on the basis of aluminum by method of high-temperature exchange reactions in salt melts. *Tsvetnye Met.* 2014, 3, 22–26.
24. Yatsenko, S.P.; Skachkov, V.M.; Krasnenko, T.I.; Pasechnik, L.A. Diffusion-Hardening Alloys: Synthesis, Properties and Application. Available online: <https://www.rudmet.ru/journal/1290/article/21970/> (accessed on 16 May 2022).
25. Bazhin, V.Y.; Issa, B. Influence of heat treatment on the microstructure of steel coils of a heating tube furnace. *J. Min. Inst.* 2021, 249, 393–400. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.8>
26. Sultanbekov, R.R.; Terekhin, R.D.; Nazarova, M.N. Effect of temperature fields and bottom sediments of oil products on the stress-strain state of the design of a vertical steel tank. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1431, 012055. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012055>
27. Nikitin, K.V.; Nikitin, V.I.; Deev, V.B.; Timoshkin, I.Y. The structure of alfe5 master alloys produced from recyclable scrap steel and its effect on the properties of aluminium alloys. *Tsvetnye Met.* 2020, 2020, 75–81. <http://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.10>
28. Xu, C.; Liu, X.; Ma, F.; Wang, Z.; Wang, W.; Ma, C. Preparation of Al-Sc Master Alloy by Aluminothermic Reaction with Special Molten Salt. In *ICAA13 Pittsburgh*; Weiland, H., Rollett, A.D., Cassada, W.A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2012; pp. 195–200.
29. Savchenkov, S.A.; Bazhin, V.Y.; Povarov, V.G. Research on the process of gadolinium recovery from the melt of salts on formation of Mg-Zn-Gd master alloys for manufacturing of magnesium and aluminium special-purpose alloys. *Non-Ferr. Met.* 2020, 48, 35–40. <http://doi.org/10.17580/nfm.2020.01.06>

30. Meier, J.M.; Miao, J.; Liang, S.M.; Zhu, J.; Zhang, C.; Caris, J.; Luo, A.A. Phase equilibria and microstructure investigation of Mg-Gd-Y-Zn alloy system. *J. Magnes. Alloy.* 2021, 10, 689–696. <http://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.019>
31. Zhao, D.; Chen, X.; Li, J.; Tan, J.; Pan, F. Microstructure, texture and mechanical properties of the rolled high modulus Mg-Y-Zn-Al-Li alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 2022, 831, 142242. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142242>
32. Takagi, K.; Hashamova, E.; Dienwiebel, M.; Mine, Y.; Takashima, K. Correlation of wear behaviour and microstructural evolution in Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered phase. *Wear* 2021, 482–483, 203983. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203983>
33. Chen, H.; Wang, J.; Meng, X.; Xie, Y.; Li, Y.; Wan, L.; Huang, Y. Ultrafine-grained Mg-Zn-Y-Zr alloy with remarkable improvement in superplasticity. *Mater. Lett.* 2021, 303, 130524. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130524>
34. Li Bi, G.; Wang, Y.; Jiang, J.; Gu, J.; Li, Y.; Chen, T.; Ma, Y. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Y-Zn (Ni) alloys. *J. Alloy. Compd.* 2021, 881, 160577. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160577>
35. Zhang, Y.; Ye, C.; Shen, Y.; Chang, W.; John, S.D.; Wang, G.; Zhai, Q. Grain refinement of hypoeutectic Al-7wt.%Si alloy induced by an Al-V-B master alloy. *J. Alloy Compd.* 2020, 812, 152022. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152022>
36. Belkin, G.I. *Proizvodstvo Magnij-Cirkonievyh Ligatur i Splavov [Production of Magnesium-Zirconium Alloys and Alloys]*; Metallurgizdat: Moscow, Russia, 2001; 146p.
37. Emley, E.F. *Principles of Magnesium Technology* Pergamon Press, 1st ed.; Pergamon Press: Oxford, UK, 1966; ISBN 978-0080106731.
38. Ohmann, S.; Ditzte, A.; Scharf, C. Re-melting of magnesium chips. *World Metall.—Erzmetall* 2014, 67, 330–338.
39. Development Strategies for Non-Ferrous Metallurgy in Russia. Available online: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (accessed on 16 May 2022).
40. Pyagay, I.N.; Shaidulina, A.A.; Konoplin, R.R.; Artyushevskiy, D.I.; Gorshneva, E.A.; Sutyaginsky, M.A. Production of Amorphous Silicon Dioxide Derived from Aluminum Fluoride Industrial Waste and Consideration of the Possibility of Its Use as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Catalyst Supports. *Catalysts* 2022, 12, 162. <http://doi.org/10.3390/catal12020162>
41. Kondrasheva, N.K.; Rudko, V.A.; Nazarenko, M.Y.; Gabdulkhakov, R.R. Influence of parameters of delayed asphalt coking process on yield and quality of liquid and solid-phase products. *J. Min. Inst.* 2020, 241, 97–104. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.97>
42. Kameshkov, A.V.; Kondrasheva, N.K.; Gabdulkhako, R.R.; Rudko, V.A. Comparison of coking additives obtained from different types of oil stock. *Tsvetnye Met.* 2020, 2020, 35–42. <http://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.05>
43. Yurak, V.V.; Dushin, A.V.; Mochalova, L.A. Vs sustainable development: Scenarios for the future. *J. Min. Inst.* 2020, 242, 242–247. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.242>
44. Sultanbekov, R.; Islamov, S.; Mardashov, D.; Beloglazov, I.; Hemmingsen, T. Research of the Influence of Marine Residual Fuel Composition on Sedimentation Due to Incompatibility. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1067. <http://doi.org/10.3390/jmse9101067>
45. Litvinenko, V.; Bowbrick, I.; Naumov, I.; Zaitseva, Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *J. Clean. Prod.* 2022, 338, 130530. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
46. Zhukovskiy, Y.; Tsvetkov, P.; Buldysko, A.; Malkova, Y.; Stoianova, A.; Koshenkova, A. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic. *Resources* 2021, 10, 124. <http://doi.org/10.3390/resources10120124>
47. Aleksandrova, T.N.; Heide, G.; Afanasova, A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *J. Min. Inst.* 2019, 235, 30–37. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>
48. Ouyang, Y.; Liu, K.; Peng, C.; Chen, H.; Tao, X.; Du, Y. Investigation of diffusion behavior and mechanical properties of Mg-Zn system. *Calphad* 2019, 65, 204–211. <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2019.03.003>
49. Savchenkov, S.A.; Bazhin, V.Y.; Brichkin, V.N.; Ugolkov, V.L.; Kasymova, D.R. Synthesis of magnesium-zinc-yttrium master alloy. *Lett. Mater.* 2019, 9, 339–343. <http://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-3-339-343>