

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ В ОТЛИВКАХ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ12 (ZK51)

© 2022 г. **А.В. Колтыгин, В.Е. Баженов, С.А. Таволжанский, С.В. Матвеев,  
И.В. Плисецкая, М.В. Белов, А.В. Самохин, В.Д. Белов**

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

*Статья поступила в редакцию 02.02.22 г., доработана 01.04.22 г., подписана в печать 05.04.22 г.*

**Аннотация:** В отливках, полученных из магниевых сплавов, часто возникают литейные дефекты усадочной природы или изъяны, связанные с поверхностным окислением металла в форме (загары). Подобные дефекты можно заделывать путем их разделки и последующей заварки или наплавки с использованием специальной присадочной проволоки. В России объем потребляемой присадочной проволоки очень мал, поэтому специально ее производством отечественные предприятия не занимаются, ограничиваясь импортом либо кустарно произведенными низкокачественными суррогатами. Тем не менее потребность в присадочной проволоке имеется, причем в последнее время покрывать ее импортными материалами стало невыгодно из-за сильно возросшей цены. Поэтому существует необходимость в исследовании технологии ее получения для замещения импортных образцов присадочной проволоки отечественным материалом. В работе изучали магниевые сплавы на базе системы Mg–Zn–Zr (La, Nd): СВ1, СВ122 и МЛ12, применяемые в качестве присадочной проволоки для заварки дефектов в отливках из сплава МЛ12. Образцы получали методом наполнительного литья в алюминиевые цилиндрические изложницы с последующим горячим экструдированием в присадочную проволоку диаметром 4 мм. В результате проведенных исследований было показано, что все изученные сплавы могут быть получены в виде проволоки диаметром 4 мм. Исследованные образцы проволоки из сплава СВ122 использованы в качестве присадочного материала для заварки дефектов отливок из магниевых сплавов МЛ12. Сварной шов в состоянии Т1 имеет предел прочности на растяжение ( $\sigma_b$ ), составляющий около 80 % от предела прочности материала отливки.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, заварка, литейные дефекты, присадочный сплав, микроструктура, механические свойства.

**Колтыгин А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ), НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: misistlp@mail.ru.

**Баженов В.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: v.e.bagenov@gmail.com.

**Таволжанский С.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: stavolj@gmail.com.

**Матвеев С.В.** – канд. техн. наук, начальник отдела Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы» (ИЦ ЛТМ), НИТУ «МИСиС». E-mail: matveev.ltm@mail.ru.

**Плисецкая И.В.** – канд. техн. наук, ст. препод. кафедры ЛТиХОМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: inga.plisetskaya@gmail.com.

**Белов М.В.** – канд. техн. наук, зам. директора ИЦ ЛТМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: belov.ltm@mail.ru.

**Самохин А.В.** – начальник цеха ИЦ ЛТМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: samohin\_anton@bk.ru.

**Белов В.Д.** – докт. техн. наук, зав. кафедрой ЛТиХОМ, НИТУ «МИСиС». E-mail: vdbelov@mail.ru.

*Для цитирования:* Колтыгин А.В., Баженов В.Е., Таволжанский С.А., Матвеев С.В., Плисецкая И.В., Белов М.В., Самохин А.В., Белов В.Д. Получение присадочной проволоки для заварки дефектов в отливках из магниевых сплавов МЛ12 (ZK51). *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2022. Т. 28. No. 3. С. 47–56. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-47-56.

## Production of filler rods for repair welding of ML12 (ZK51) magnesium alloy castings

**A.V. Koltugin, V.E. Bazhenov, S.A. Tavalzhanskii, S.V. Matveev, I.V. Plisetskaya,  
M.V. Belov, A.V. Samokhin, V.D. Belov**

National University of Science and Technology «MISIS» (NUST «MISIS»), Moscow, Russia

*Received 02.02.2022, revised 01.04.2022, accepted for publication 05.04.2022*

**Abstract:** In magnesium alloys castings, the casting defects such as shrinkage porosity are often occur. Such defects can be suppressed by repair welding or surfacing using a special filler rod. Unfortunately, in Russia, the low amount of filler rod is consumed. Therefore, native enterprises

do not manufacture it, limiting themselves to imports or homemade low-quality substitutes. Nevertheless, there is a need for filler rod, and recently it has become unprofitable to replace them with imported materials due to a significantly increased price. Therefore, there is a need to study the technology of its production to replace imported filler rod with native material. Magnesium alloys based on the Mg–Zn–Zr (La, Nd) system: SV1, SV122, and ML12 (ZK51) that used as a filler rod for repair welding of ZK51 alloy castings were studied in this work. The samples were obtained by permanent mold casting into aluminum molds followed by hot extrusion into a filler rod with a diameter of 4 mm. It was shown that all the investigated alloys could be obtained in the form of a rod with a diameter of 4 mm. Therefore, the investigated rod samples from the SV122 alloy were used as filler material for repair welding of ZK51 magnesium alloy castings. The weld seam in the T1 condition has an ultimate tensile strength (UTS) about 80 % of the UTS of the casting material.

**Keywords:** magnesium alloys, repair welding, casting defects, filler alloy, microstructure, mechanical properties.

**Koltygin A.V.** – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of foundry technologies and material art working (FT&MAW), National University of Science and Technology «MISIS» (NUST «MISIS») (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: misistlp@mail.ru.

**Bazhenov V.E.** – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of FT&MAW, NUST «MISIS». E-mail: v.e.bagenov@gmail.com.

**Tavolzhanskii S.A.** – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of FT&MAW, NUST «MISIS». E-mail: stavolj@gtmail.com.

**Matveev S.V.** – Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of Engineering center of foundry technologies and materials, NUST «MISIS». E-mail: matveev.ltm@mail.ru.

**Plisetskaya I.V.** – Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer, Department of FT&MAW, NUST «MISIS». E-mail: inga.plisetskaya@gmail.com.

**Belov M.V.** – Cand. Sci. (Eng.), vice director of the Department of Engineering center of foundry technologies and materials, NUST «MISIS». E-mail: belov.ltm@mail.ru.

**Samokhin A.V.** – head of the workshop of the Department of Engineering center of foundry technologies and materials, NUST «MISIS». E-mail: samokhin\_anton@bk.ru.

**Belov V.D.** – Dr. Sci. (Eng.), head of the Department of FT&MAW, NUST «MISIS». E-mail: vdbelov@mail.ru.

**For citation:** Koltygin A.V., Bazhenov V.E., Tavolzhanskii S.A., Matveev S.V., Plisetskaya I.V., Belov M.V., Samokhin A.V., Belov V.D. Production of filler rods for repair welding of ML12 (ZK51) magnesium alloy castings. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 47–56 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-47-56.

## Введение

Широкий интервал кристаллизации большинства литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr часто приводит к возникновению литейных дефектов усадочной природы, многие из которых заделываются путем заварки и наплавки с использованием специальной присадочной проволоки. Особенно часто усадочные дефекты проявляются в отливках, изготавливаемых из сплава МЛ12 (ZK51), который относится к трудносвариваемым материалам [1].

В настоящее время для заварки дефектов обычно применяют метод заварки с нерасходуемым электродом в среде инертного газа (tungsten inert gas — TIG) [2] с использованием присадочного материала. Также для этой цели применяют аргонодуговую [3–10] и лазерную сварку с использованием порошка или присадочной проволоки [11, 12]. Для заварки магниевого сплава МЛ12 (ГОСТ 2856-79) в качестве присадочного материала обычно применяют базовый сплав (это материал, из которого изготовлена отливка) либо сплавы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ). За рубежом рекомендуют заваривать отливки из

сплавов ZK51 и ZK41 с помощью присадочной проволоки из сплава EZ33 (2,0–3,1 Zn, 0,45–1,0 Zr, 2,5–4,0 РЗМ)<sup>1</sup> [1, 10]. В России сплав СВ122 (4,0–5,0 Zn, 0,6–1,1 Zr, 1,1–1,5 La) [13, 14] используют для заварки отливок из сплава МЛ12, поскольку лантан, входящий в состав сплава СВ122, может способствовать увеличению доли эвтектики, измельчению зерна и сужению интервала кристаллизации, тем самым снижая вероятность образования горячих трещин в зоне заварки [12, 15]. Кроме того, известен сплав СВ1 (1,0–1,8 Zn, 0,4–1,0 Zr, 3,0–3,7 Ce; ГОСТ Р 56031-2014), применяемый для изготовления прессованной проволоки для заварки магниевых отливок, который, в отличие от сплавов EZ33 и СВ122, содержит меньше цинка, что сужает температурный интервал кристаллизации сплава.

Из-за малых объемов потребляемой присадочной проволоки она в России практически не производится. Это вынуждает предприятия из-

<sup>1</sup> Здесь и далее указано содержание в мас. %.

готовливать ее заменители своими силами. Чаще всего присадочным материалом служат самодельные литые полосы из сплава, применяемого для получения отливок. Однако для создания качественного сварного шва необходимо использовать экструдированную проволоку вместо литых полос ввиду значительных дефектов литого материала (пористость, шлаковые включения, плены и т.п.) и более низкой концентрации водорода в проволоке [10, 13, 14].

Основным критерием для оценки возможности свариваемости изделия из магниевого сплава является его склонность к образованию горячих трещин [16]. У таких магниевых сплавов, как МЛ10, МЛ12, AZ80, WE43, наблюдается высокая вероятность возникновения горячих трещин при заварке [4–6, 8, 12, 16, 17].

Чаще всего состав присадочной проволоки близок или совпадает с составом завариваемой отливки. Это обеспечивает совпадение цвета места заварки, отсутствие негативного влияния на коррозионную стойкость, а также одинаковое влияние термообработки на структуру и свойства тела отливки и места заварки.

Для сплава МЛ12 рекомендуется производить сварку после термообработки, предварительно нагрев заготовку до температуры 315 °С. После сварки отливку также желательно термообработать по двухступенчатому режиму: при  $t = 330$  °С в течение 2 ч и при  $t = 175$  °С,  $\tau = 16$  ч [18]. В работе [19] предлагается более высокая температура нагрева под сварку для сплава МЛ12: до 380–420 °С. Термообработка и нагрев заготовки перед заваркой также рекомендуются и для других магниевых сплавов [8, 9, 20, 21].

Целью работы являлась разработка технологии получения прутков диаметром 4 мм из сплавов системы Mg–PЗМ(La, Nd)–Zn–Zr для возможности использования их в качестве присадочного материала при сварке деталей из магниевого сплава МЛ12 с опробованием полученной присадочной проволоки.

## Материалы и методики исследования

### Методика приготовления образцов присадочной проволоки

Для приготовления сплавов использовали следующие шихтовые материалы: магний Mg90 (99,9 % Mg, ГОСТ 804-93), цинк Ц0 (99,98 % Zn,

ГОСТ 3640-94), лантан ЛаМ-1 (99,8 % La), лигатура Л4: Mg–15%Zr (СМЗ, г. Соликамск), лигатура МН: Mg–20%Nd. Из-за склонности циркония к гравитационной ликвации выплавку сплавов осуществляли в лабораторной индукционной тигельной печи РЭЛТЕК (г. Екатеринбург) в стальных сварных тиглях. Масса одной плавки составляла 4 кг. Для защиты расплава от возгорания применяли карналлит ( $KCl \cdot MgCl_2$ ). Сплавы заливали в алюминиевые цилиндрические изложницы диаметром 60 мм и высотой 200 мм. Разливку осуществляли при температуре  $760 \pm 10$  °С.

Выплавляли образцы сплавов СВ1, СВ122 и МЛ12, причем для легирования сплава СВ1 вместо церия использовали неодим. Это связано с тем, что неодим имеет более высокую растворимость в магнии, а значит, окажет меньшее негативное влияние на механические и коррозионные характеристики сплава сварного шва. Химический состав приготовленных сплавов определяли методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на площади  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Vega SBH3» (Tescan, Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа (Oxford, Великобритания). Состав приготовленных сплавов представлен в таблице.

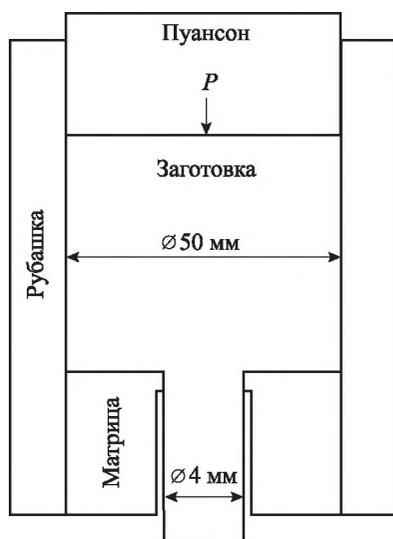
После затвердевания от полученных слитков отрезали головную и донную части, содержащие литейные дефекты. Полученные слитки обрабатывали на токарном станке до диаметра 50 мм и высоты 140 мм. После этого заготовки подвергали горячей экструзии через матрицу диаметром 4 мм (рис. 1). Перед экструзией заготовки нагревали до  $t = 430-450$  °С и помещали в контейнер, нагретый до  $t = 400$  °С. Скорость движения пуансона составляла 1 мм/с, а коэффициент вытяжки, рассчитанный как отношение начальной площади поперечного сечения заготовки к получаемой в результате деформации площади поперечного сечения, составил 156. Получаемый пруток вытягивался из матрицы для предотвращения его деформации до полной выработки заготовки, после чего разрезался на мерные длины ~800 мм.

Микроструктуру и содержание элементов в сплавах изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Vega SBH3» (Tescan, Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа (Oxford, Великобритания). Исследование макроструктуры литых сплавов проводили с использованием оптического микроскопа

**Состав присадочных сплавов**

Composition of filler alloys

Сплав	Основные компоненты, %				
	Mg	Zn	Zr	La	Nd
СВ1	Осн.	0,96	0,57	–	2,91
СВ122	Осн.	3,82	0,66	1,10	–
МЛ12	Осн.	4,01	0,69	–	–

**Рис. 1.** Схема проведения экструзии заготовки**Fig. 1.** The extrusion process scheme

(ОМ) «Axio Observer.D1m» (Carl Zeiss, Германия). Выявление границ зерен осуществляли с помощью травителя состава: 11 г пикриновой кислоты, 11 мл уксусной кислоты и 100 мл этилового спирта. Размер зерна определяли методом секущих с помощью программы «Sizer» (каф. МЦМ, НИТУ «МИСиС»).

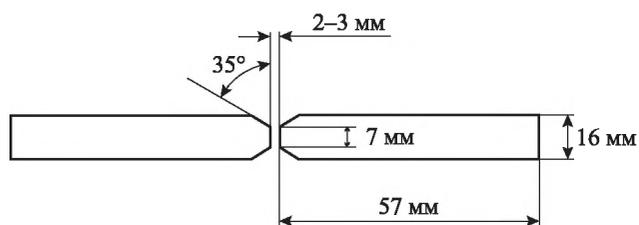
**Методика приготовления сварных образцов**

Заготовки, из которых были изготовлены сварные и контрольные (из сплава той же самой плавки, что и сварные) образцы, вытачивали на токарном станке из темплетов, вырезанных из отливки, изготовленной из сплава МЛ12 в ООО «ЛМЗ «АвиаЛит» (г. Москва). Сварной и контрольный образцы использовали для проведения сравнительных механических испытаний по ГОСТ 1497-84. Образцы подвергали испытаниям в термообработанном состоянии по режиму Т1, ОСТ1 90121-90 (состарен-

ные из литого состояния), принятому для сплава МЛ12: старение при  $t = 300 \pm 5$  °С в течение 6 ч с последующим охлаждением на воздухе. Образцы для механических испытаний представляли собой стандартные образцы типа III с диаметром рабочей части 6 мм. Сварной шов в сварных образцах находился по центру рабочей части.

Заготовки под сварку были подготовлены в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Толщина образцов квадратного сечения была обусловлена возможностями имеющегося сварочного оборудования и геометрическими размерами образцов для испытания на разрыв, разделка кромок — X-образная.

Для сварки образцов использовался аргодуговой сварочный аппарат ESAB Caddy TIG 2200 AC/DC (Швеция) с нерасходуемым вольфрамовым электродом (TIG). Подогрев образцов перед сваркой осуществлялся в печи сопротивления по режиму: нагрев до 350 °С за 1,5 ч, выдержка при  $t = 350$  °С,  $\tau = 2$  ч. Образцы размещались на массивной чугунной подложке, вместе с которой извлекались из печи, и на ней же производилась сварка током 220 А. Поверхность присадочной проволоки перед применением механически очищали и обезжировали. После сварки выполняли термическую обработку образцов по двухступенчатому режиму: 1 ступень — нагрев до 330 °С за 2 ч, выдержка при  $t = 330$  °С,  $\tau = 2$  ч, охлаждение на возду-

**Рис. 2.** Схема заготовок, подготовленных под сварку**Fig. 2.** Drawing of samples for welding

хе до комнатной температуры; 2 степень — нагрев до 180 °С за 1 ч, выдержка при  $t = 180$  °С,  $\tau = 16$  ч. Термообработку проводили с целью гомогенизации состава и снятия термических напряжений в образцах после сварки.

### Методика проведения испытаний сварного шва

Контроль качества сварных соединений осуществляли визуально на всех стадиях изготовления, а также с помощью универсального рентгеновизионного комплекса «Филин 238» (АО «Тестрон», г. Санкт-Петербург) после того, как была проведена выточка образцов для механических испытаний.

В ходе испытаний определяли предел прочности ( $\sigma_B$ ) и предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) образцов при комнатной температуре по ГОСТ 1497-84. Испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине «Instron 5569» (США). Испытывали по 5 контрольных и сварных образцов.

### Методика расчета температурного интервала кристаллизации

Расчеты температурного интервала кристаллизации и зависимости доли твердой фазы от температуры при равновесной и неравновесной (по Шейлу—Гулливеру) кристаллизации сплавов были выполнены с помощью программы «Thermo-Calc 2016b» [22] с использованием термодинамической базы данных сплавов на основе магния TTMG3.

## Результаты и их обсуждение

### Изучение микроструктуры присадочной проволоки

Микроструктуры полученных литых заготовок представлены на рис. 3. Видно, что у сплавов СВ1 и СВ122 они схожи и отличаются от структуры сплава МЛ12 наличием значительного количества эвтектической фазы по границам твердого раствора на основе магния ( $\alpha$ -Mg). Самой мелкозернистой структурой обладает сплав МЛ12, средний размер литого зерна которого не превышает 50 мкм. Сплавы СВ1 и СВ122 имеют примерно одинаковый размер литого зерна, который несколько крупнее, чем у МЛ12, и достигает 100 мкм.

Присутствие РЗМ в сплавах СВ1 и СВ122 приводит к образованию интерметаллических соединений магния с РЗМ, располагающихся в структуре по границам первичных дендритов твердого раствора на основе магния. В соответствии с результатами микрорентгеноспектрального анализа, это фаза  $Mg_{12}Nd$  в сплаве СВ1 и  $Mg_{12}La$  в сплаве СВ122. Наибольшее количество интерметаллических соединений, формирующихся по эвтектической реакции по границам зерен твердого раствора на основе магния, обнаружено в сплаве СВ1. В сплаве СВ122 присутствует меньшее их количество из-за меньшего содержания РЗМ. В сплаве МЛ12 отсутствуют РЗМ, поэтому вторая фаза, образующаяся по границам  $\alpha$ -Mg, представляет собой соединение магния с цинком ( $Mg_7Zn_3$ ) [23], а ее количество невелико по сравнению с другими сплавами.

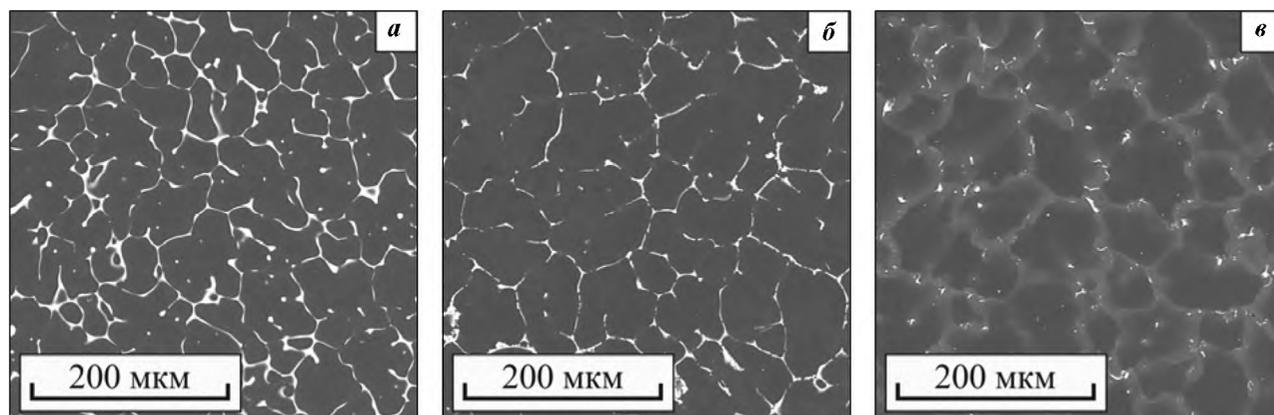


Рис. 3. Микроструктура литых заготовок (СЭМ)

*a* – сплав СВ1, *б* – СВ122, *в* – МЛ12

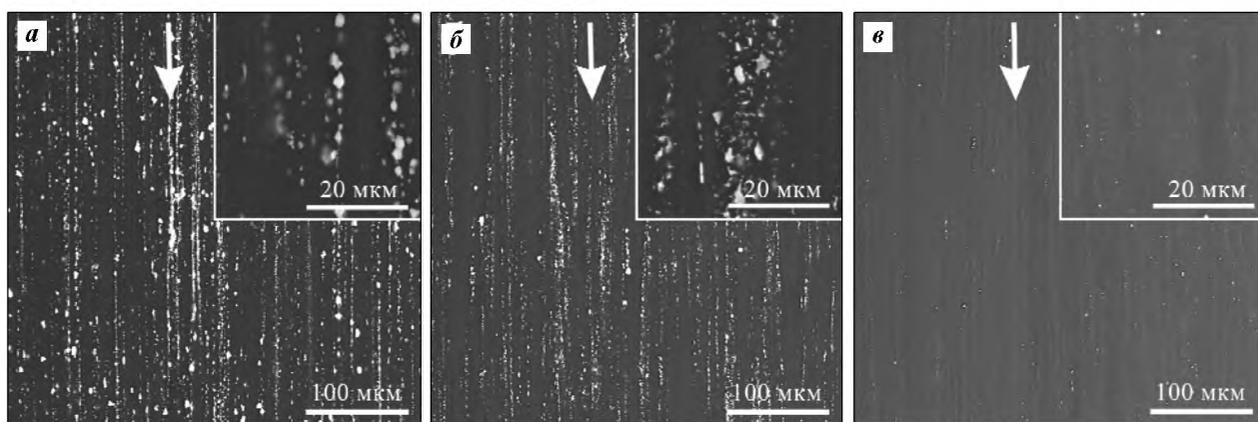
Fig. 3. Microstructure of ingots in as-cast condition (SEM)

*a* – SV1 alloy, *б* – SV122 alloy, *в* – ZK51 alloy

Микроструктура сплавов после горячей экструзии представлена на рис. 4. Видно, что в образцах присутствует ярко выраженная текстура, сформированная за счет течения твердого металла через калибровочное отверстие матрицы. Интерметаллические соединения, образованные в процессе кристаллизации сплавов СВ1 и СВ122 в результате экструзии, подверглись дроблению и представляют собой строчные включения мелких частиц размером примерно 1 мкм, расположенные по направлению течения металла при деформации.

В деформированном состоянии наблюдается сильное измельчение зерна в сплавах (рис. 5). Наименьший размер зерна был достигнут в сплаве СВ122 (3,7 мкм), а наибольший — в сплаве СВ1 (5,4 мкм), у сплава МЛ12 размер зерна составляет 4,6 мкм.

Для выявления возможности использования присадочной проволоки, изготовленной методом горячей экструзии, провели сварку образцов. Ее выполняли с помощью присадочной проволоки из сплава СВ122. Выбор сплава был обусловлен схо-



**Рис. 4.** Микроструктура (СЭМ) заготовок после проведения горячей экструзии (продольный шлиф)

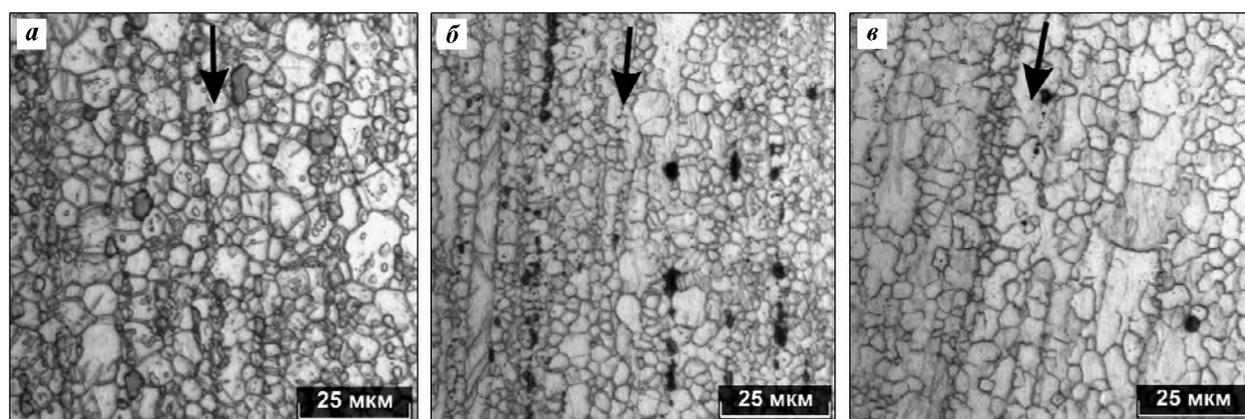
*a* – сплав СВ1, *б* – СВ122, *в* – МЛ12

Стрелками показано направление экструдирования заготовки

**Fig. 4.** Microstructure (SEM) of hot extruded rods (longitudinal section)

*a* – SV1 alloy, *б* – SV122 alloy, *в* – ZK51 alloy

Arrows indicates extrusion direction



**Рис. 5.** Микроструктура (ОМ) заготовок после проведения горячей экструзии (продольный шлиф)

*a* – сплав СВ1, *б* – СВ122, *в* – МЛ12

Стрелками показано направление экструдирования заготовки

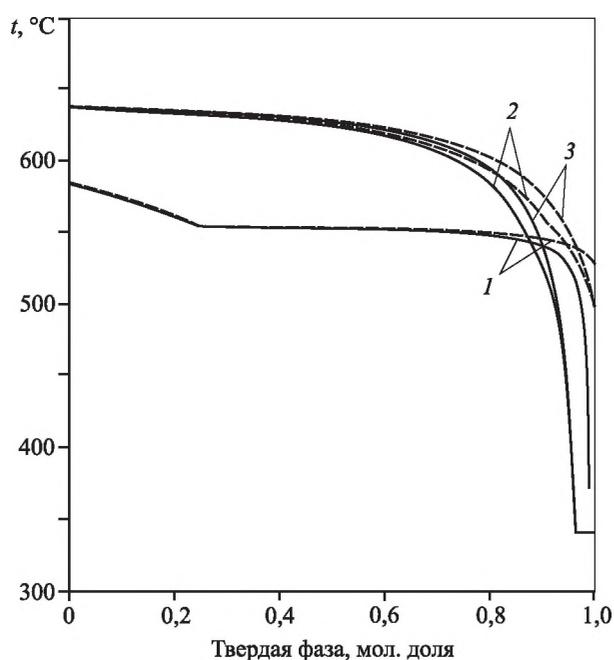
**Fig. 5.** Microstructure (OM) of hot extruded rods (longitudinal section)

*a* – SV1 alloy, *б* – SV122 alloy, *в* – ZK51 alloy

Arrows indicates extrusion direction

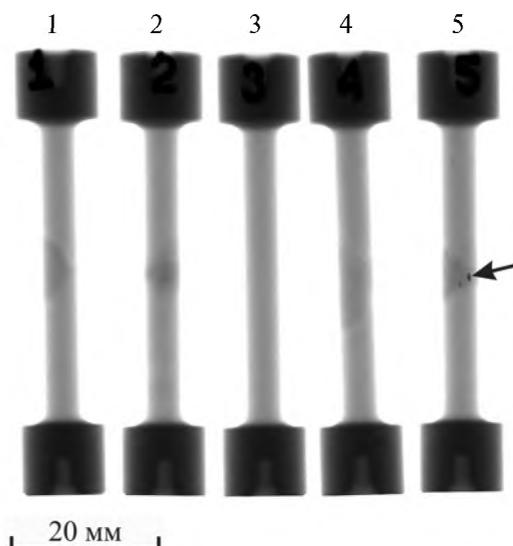
жестью неравновесного температурного интервала кристаллизации сплавов СВ122 и МЛ12 (рис. 6) — это должно уменьшить термические напряжения при соединении сплавов с различными теплофизическими свойствами и снизить, ввиду присутствия лантана, вероятность образования горячих трещин за счет образования дополнительной эвтектики. Сплав СВ122 традиционно используется на отечественных предприятиях для заварки отливок из сплава МЛ12, поскольку является по сути сплавом МЛ12 с небольшой добавкой лантана [19].

Результаты рентген-контроля стандартных образцов для испытаний на разрыв, выточенных из сваренных с применением присадочной проволоки заготовок, показаны на рис. 7. В некоторых образцах замечены дефекты в области сварного шва (отмечено стрелкой). Несмотря на выявленные дефекты, все образцы были подвергнуты испытаниям на разрыв. Для сравнения испытаниям были



**Рис. 6.** Изменение мольной доли твердой фазы в интервале кристаллизации для сплавов СВ1 (1), СВ122 (2) и МЛ12 (3), рассчитанное в программе «Thermo-Calc» для равновесной (сплошные линии) и неравновесной (по модели Шейла–Гулливера, штриховые) кристаллизации

**Fig. 6.** Change of solid phase mole fraction in freezing range for SV1 (1), SV122 (2), and ZK51 (3) alloys, calculated via Thermo-Calc software for equilibrium (solid lines) and non-equilibrium solidification (in accordance with Scheil–Gulliver model, dashed lines)



**Рис. 7.** Рентгеновский снимок сварных соединений в образцах для испытаний на разрыв  
Стрелкой показан дефект сварного шва

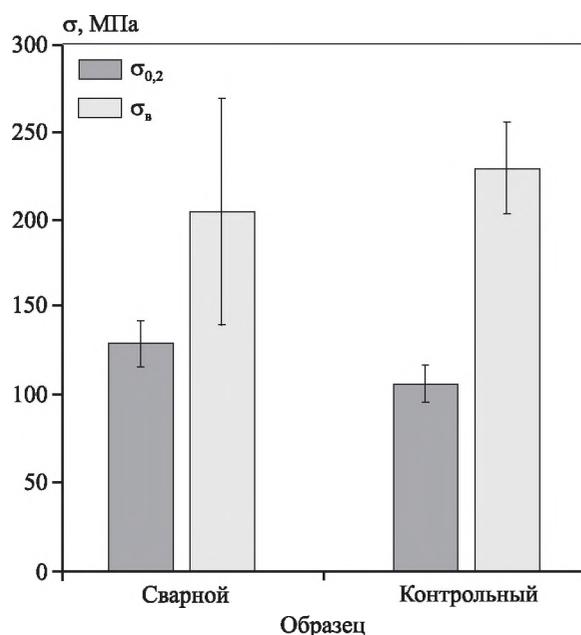
**Fig. 7.** X-ray photograph of weld joints in tensile test samples  
The arrow shows the weld defect

подвергнуты контрольные образцы, изготовленные из сплава той же самой плавки, что и сварные образцы. Некоторые сварные образцы, подвергнутые испытаниям, продемонстрировали очень низкие свойства, их не учитывали в итоговых подсчетах.

Результаты механических испытаний представлены на рис. 8. У сварных образцов, по сравнению с контрольными, выявлено некоторое снижение предела прочности, а также больший разброс его значений. Так, если для контрольных образцов величина  $\sigma_b$  изменялась от 201 до 248 МПа, то для не имеющих видимых дефектов сварных образцов интервал  $\sigma_b$  составлял от 162 до 247 МПа.

Анализ изломов сварных образцов с низкими механическими свойствами показал, что их поверхность окислена, а их цвет варьируется от желтоватого до темно-коричневого. Это указывает на наличие протяженных микротрещин (по которым и произошло разрушение образцов), возникающих в нагретом состоянии, т.е. в процессе проведения заварки. При анализе шлифов, сделанных в области сварного шва образцов, имевших низкие значения прочности на растяжение, отмечены многочисленные микротрещины, проходящие по границам зерен твердого раствора (рис. 9). Причиной образования микротрещин могут служить на-

пряжения, возникающие в сварном шве в результате быстрого или неравномерного охлаждения заготовки либо из-за отклонения температуры образцов при сварке от рекомендуемой для спла-



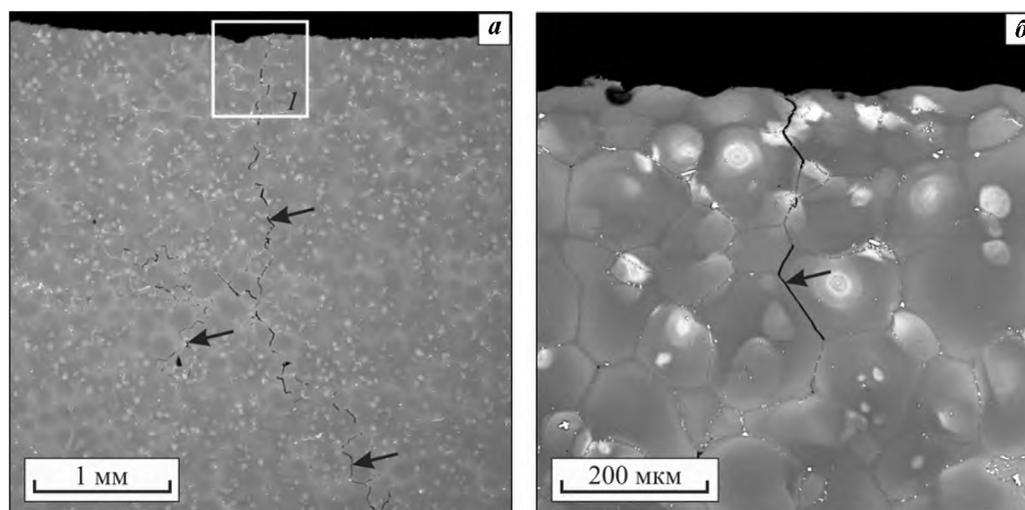
**Рис. 8.** Механические свойства сварных и контрольных образцов из сплава МЛ12 после термической обработки

**Fig. 8.** The mechanical properties of welded and control samples made of ZK51 alloy after heat treatment

ва МЛ12. Излом контрольных образцов, выточенных из литых заготовок, имел белый цвет. Сам излом оказался вязким, и на образцах после испытания была заметна область образования «шейки». Изломы сварных образцов, продемонстрировавших хорошие механические свойства, имели сходный вид. Они также были белого цвета, без присутствия плен и неметаллических включений.

Было установлено, что микроструктура образцов в зоне сварного шва представляет собой твердый раствор на основе магния. Зерна магниевого твердого раствора в области сварного шва имеют размер 50–150 мкм, по их границам и в центре заметны точечные включения фазы, богатой цирконием (белого цвета на рис. 9, б). Микрорентгеноспектральный анализ показывает наличие La в количестве 0–0,5 %. Это меньше, чем в исходной присадочной проволоке из сплава СВ122, что является результатом смешивания материалов отливки и присадочной проволоки в зоне сварки.

Для проверки пригодности использования полученной проволоки в качестве присадочного материала для заварки была проведена заварка дефектов усадочного происхождения в отливке из сплава МЛ12 в промышленных условиях. Присадочным материалом служил сплав СВ122. Отливки прошли сдаточные испытания и были признаны годными к использованию.



**Рис. 9.** Трещины в сварном соединении (показаны стрелками) образцов из сплава МЛ12 (СЭМ) *а* – сварной шов при малом увеличении; *б* – выделенная на рис. 9, *а* область 1 при большем увеличении

**Fig. 9.** Weld cracks (indicated by arrows) in ZK51 alloy samples (SEM)

*а* – welded seam at low magnification; *б* – area 1 highlighted in Fig. 9, *а* at higher magnification

## Выводы

1. Показана возможность проведения горячей экструзии сплавов СВ1, СВ122 и МЛ12 без дополнительной термической обработки заготовок перед прессованием с получением присадочной проволоки диаметром 4 мм, пригодной для проведения заварки магниевых отливок.

2. После горячей экструзии структура сплавов имеет выраженную текстуру с мелкодисперсными строчными включениями интерметаллических фаз, причем наибольшее количество этих фаз наблюдается в сплаве СВ1, а в сплаве МЛ12 они практически отсутствуют, как и в литых заготовках.

3. В деформированном состоянии наблюдается сильное измельчение зерна по сравнению с литыми заготовками во всех изученных сплавах: от 50–100 мкм в литом состоянии до 4–6 мкм после горячей экструзии.

4. В случае получения бездефектного сварного шва, после термической обработки по двухступенчатому режиму (1-я ступень — нагрев до 330 °С за 2 ч, выдержка при этой температуре в течение 2 ч, охлаждение на воздухе до комнатной температуры; 2-я ступень — нагрев до 180 °С за 1 ч с последующей выдержкой 16 ч), величина  $\sigma_b$  сварного шва составляет не менее 80 % от  $\sigma_b$  свариваемого металла, а  $\sigma_{0,2}$  — не меньше, чем у свариваемого металла. Основной причиной разрушения сварных образцов являются микротрещины, проходящие по границам зерен сплава.

## Литература/References

1. Liu L. Welding and joining of magnesium alloys. 1-st ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. DOI: 10.1533/9780857090423.
2. Bettles C., Barnett M. Advances in wrought magnesium alloys. Fundamentals of processing, properties and applications. 1-st ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
3. Лобанов Л.М., Пащин Н.А., Савицкий В.В., Миходуй О.Л. Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях жаропрочного магниевого сплава МЛ10 после электродинамической обработки. *Пробл. прочности*. 2014. No. 6. С. 33–41. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Savitskii V.V., Mikhodui O.L. Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *Problemy prochnosti*. 2014. No. 6. P. 33–41 (In Russ.).
4. Шаломеев В.А. Улучшение макро- и микроструктуры авиационного литья из магниевых сплавов. *Вестн. двигателестроения*. 2013. No. 1. С. 127–132. Shalomeev V.A. Improvement of the macro- and microstructure of aviation castings from magnesium alloys. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2013. No. 1. P. 127–132 (In Russ.).
5. Шаломеев В.А., Цивирко Э.И., Петрик И.А., Лукинов В.В. Заварка поверхностных дефектов литья из сплава МЛ-10 скандийсодержащим материалом. *Автом. сварка*. 2009. No. 3. С. 34–38. Shalomeev V.A., Tsivirko E.I., Petrik I.A., Lukinov V.V. Welding of surface defects in casting from ML-10 alloy with scandium-containing material. *Avtomaticheskaya svarka*. 2009. No. 3. P. 34–38 (In Russ.).
6. Шаломеев В.А., Цивирко Э.И., Клочихин В.В., Зинченко М.М. Исправление дефектов корпусных деталей из сплава МЛ10 для ГТД. *Вестн. двигателестроения*. 2015. No. 1. С. 122–127. Shalomeev V.A., Tsivirko E.I., Klochikhin V.V., Zinchenko M.M. Correction of defects in body parts made of ML10 alloy for gas turbine engines. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2015. No. 1. P. 122–127 (In Russ.).
7. Adamiec J. Repairing the WE43 magnesium cast alloys. *Solid State Phenomena*. 2011. Vol. 176. P. 99–106. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.176.99>.
8. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Mikhodui O.L., Khokhlova J.A. Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *J. Magnesium Alloys*. 2016. Vol. 4. P. 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.04.005>.
9. Adamiec J., Roskosz S., Jarosz R. Repair of magnesium alloy castings by means of welding and pad welding. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2007. Vol. 22. P. 21–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.176.99>.
10. Węgrzyn J., Mazur M., Szymański A., Balcerowska B. Development of a filler for welding magnesium alloy GA8. *Weld. Int.* 1987. Vol. 1. P. 146–150. <https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.1.8>.
11. Никитин А.И., Кульчин Ю.Н., Гнеденков С.В., Иванов М.Н., Ионов А.А., Машталар Д.В., Пивоваров Д.С., Синябрюхов С.Л., Субботин Е.П., Шпаков А.В., Яцко Д.С. Исследование возможности практического применения волоконных технологических лазеров в задачах ремонтного восстановления деталей авиационной техники. В сб.: *IV Всеросс. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»* (28 июня 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 247–267.

- Nikitin A.I., Kul'chin Yu.N., Gnedenkov S.V., Ivanov M.N., Ionov A.A., Mashtalyar D.V., Pivovarov D.S., Sinebryukhov S.L., Subbotin E.P., Shpakov A.V., Yatsko D.S.* Study of the possibility of practical application of fiber technological lasers in the problems of repair restoration of aircraft parts. In: *IV All-Russ. Conf. «The role of fundamental research in the implementation of strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030»* (June 28, 2018). Moscow: VIAM, 2018. P. 247–267 (In Russ.).
12. *Cao X., Jahazi M., Immarigeon J.P., Wallace W.* A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *J. Mater. Process. Technol.* 2006. Vol. 171. P. 188–204. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.068>.
  13. *Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Кошелев О.В., Кошелев А.О.* Об устранении металлургических дефектов сложноконтурных отливок из Mg-сплавов. *Литейн. пр-во*. 2019. No. 2. С. 7–13.  
*Mukhina I.Yu., Duyunova V.A., Koshelev O.V., Koshelev A.O.* About elimination of metallurgical defects of complex contour castings from Mg-alloys. *Liteinoe proizvodstvo*. 2019. No. 2. P. 7–13 (In Russ.).
  14. *Кошелев А.О., Мухина И.Ю.* Совершенствование технологии устранения дефектов в крупногабаритных отливках из магниевых сплавов. В сб.: *Сб. докл. науч.-техн. конф. «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов»* (18 мая 2016 г.) М.: ВИАМ, 2016. С. 18.  
*Koshelev A.O., Mukhina I.Yu.* Improving the technology for eliminating defects in large-sized castings from magnesium alloys. In: *Sat. report scientific and technical conference «Metal science and modern developments in the field of casting, deformation and heat treatment of light alloys»* (May 18, 2016) Moscow: VIAM, 2016. P. 18.
  15. *Лукин В.И., Добрынина И.С.* Свариваемость литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr. *Сварочное пр-во*. 1998. No. 4. С. 6–8.  
*Lukin V.I., Dobrynina I.S.* Weldability of cast magnesium alloys of the Mg–Zn–Zr system. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1998. No. 4. P. 6–8 (In Russ.).
  16. *Kierzek A., Adamiec J.* Evaluation of susceptibility to hot cracking of magnesium alloys joints in variable stiffness condition. *Archives Metall. Mater.* 2011. Vol. 56. P. 759–767. DOI: 10.2478/v10172-011-0084-y.
  17. *Huang C.J., Cheng C.M., Chou C.P.* The influence of aluminum content of AZ61 and AZ80 magnesium alloys on hot cracking. *Mater. Manuf. Process.* 2011. Vol. 26. P. 1179–1187. DOI: 10.1080/10426914.2010.536936.
  18. *Liu L.* Welding and joining of magnesium alloys. Woodhead Publ. Elsevier, 2010. DOI: 10.1533/9780857090423.
  19. *Речкалов А.В., Скорняков Ю.Л., Гусева В.В.* Технологические особенности исправления дефектов отливок из магниевых сплавов. *Литейн. пр-во*. 2008. No. 3. С. 14–16.  
*Rechkalov A.V., Skornyakov Yu.L., Guseva V.V.* Special technological features of eliminating defects in magnesium alloy castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 2008. No. 3. P. 14–16 (In Russ.).
  20. *Kocurek R., Adamiec J.* The repair welding technology of casts magnesium alloy QE22. *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 212. P. 81–86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.212.81.
  21. *Stolbov V.I., El'tsov V.V., Oleinik I.A., Matyagin V.F.* Effect of the nature of thermal processes on cracking in repair welding components of magnesium alloys. *Weld. Int.* 1991. Vol. 5. P. 799–802. DOI: 10.1080/09507119109447850.
  22. *Andersson J.O., Helander T., Höglund L., Shi P.F., Sundman B.* Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science. *CALPHAD*. 2002. Vol. 26. P. 273–312. DOI: 10.1016/S0364-5916(02)00037-8.
  23. *Колтыгин А.В., Баженов В.Е.* Влияние химического состава и режимов термической обработки на фазовый состав и механические свойства магниевого сплава ZK51A (МЛ12). *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2018. No. 1. С. 64–74. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2018-1-64-74>.  
*Koltygin A.V., Bazhenov V.E.* Effect of alloy composition and heat treatment on ZK51A (ML12) magnesium alloy phase composition and mechanical properties. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2018. No. 1. P. 64–74 (In Russ.).