

УДК 669.018.28

В.А. Дуюнова<sup>1</sup>, Е.Ф. Волкова<sup>1</sup>, З.П. Уридия<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>1</sup>

## ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ МАГНИЕВЫХ И ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241

*Изложены результаты исследования и разработки перспективных сплавов и технологий их изготовления:*

– среднегабаритных поковок из нового жаропрочного магниевого сплава ВМД16; рассмотрены особенности структуры, фазового состава; показаны преимущества поковок из сплава ВМД16 по уровню основных характеристик по сравнению с поковками из сплавов-аналогов;

– фасонных отливок из современных литейных алюминиевых (ВАЛ20, АЛ4МС) и магневых (ВМЛ18, ВМЛ20) сплавов, полученных литьем в разовые формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС) и формы, изготовленные трехмерной печатью, для деталей системы рулевого управления, внутреннего набора и агрегатов перспективных самолетов и вертолетов;

– нового жаропрочного литейного магниевого сплава ВМЛ25 системы Mg–PЗМ–Zr с повышенным пределом прочности при температурах эксплуатации от 20 до 250°C.

Работы выполнены в рамках реализации комплексных научных направлений 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магневые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» и 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магневых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

**Ключевые слова:** разработка технологий деформации поковок; фасонное литье из алюминиевых и магневых сплавов; разовые формы из ХТС и формы, изготовленные трехмерной печатью; жаропрочный магневый сплав; фазовый состав; механические свойства.

V.A. Duyunova, E.F. Volkova, Z.P. Uridiya, A.V. Trapeznikov

### Dynamics of the development of magnesium and cast aluminum alloys

*The results of investigation and development of forging technology for producing of middleweight forgings from new magnesium heat-resistant VMD16 alloy are presented in the paper.*

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

*The features of structure, phase composition are considered, the advantages of main characteristics of VMD16 forgings are shown in comparison with the same of alloys-analogs.*

*Also mold castings made from modern cast aluminum alloys VAL20, AL4MS and cast magnesium alloys VML18, VML20 shaped in cold box and molds made by 3D-print are presented.*

*New heat resistant cast alloy VML25 of Mg–RE–Zr system with increased ultimate tensile strength for applications at temperatures from 20 up to 250°C is described.*

*The work is executed within implementation of the complex scientific direction 8.4. «High strength corrosion-resistant weld magnesium and cast aluminum alloys for aerospace techniques of new generation» and 10.10. «Power-efficient, resource-saving and additive technologies for production of deformable semi-finished products and mold castings from magnesium and aluminum alloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** *development of forging technology, aluminum and magnesium shaped castings, cold-box expendable molds, molds made by 3D-print, heat-resistant magnesium-based alloy, phase composition, mechanical properties.*

## Введение

Деформируемые магниевые сплавы остаются наиболее легкими из конструкционных материалов на металлической основе, применяющихся в авиационной и ракетно-космической технике, в автомобилестроении, при производстве электронной аппаратуры и т. д.

Эти материалы могут успешно применяться для элементов конструкций, подвергающихся эксплуатационному нагреву. Использование деформируемых магниевых сплавов в конструкциях летательных аппаратов (самолетов, ракет, снарядов и др.) обеспечивает снижение их массы и повышает тем самым летные характеристики – дальность и скорость полета, увеличение массы полезной нагрузки и т. д.

Внедрение новых деформируемых сплавов на магниевой основе требует применения эффективных технологий изготовления полуфабрикатов. Для создания нового поколения изделий авиационно-космической техники необходимы сплавы с повышенными прочностными характеристиками, не уступающие по своим показателям зарубежным аналогам. Задача современных отечественных материаловедов состоит не только в разработке перспективных сплавов на основе магния, но и в создании применительно к ним технологий, позволяющих получить полуфабрикаты с улучшенными эксплуатационными характеристиками [1–5].

Известно, что введение РЗЭ (редкоземельные элементы) может существенно повысить прочностные характеристики магниевых сплавов; за

рубежом все шире применяют сплавы на основе магния, легированные РЗЭ [6–10]. Разработанный во ФГУП «ВИАМ» новый магниевый деформируемый сплав ВМД16 системы легирования Mg–Zn–Zr–РЗЭ является сплавом нового поколения.

В рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» по отношению к сплаву ВМД16 была поставлена задача – разработать технологию изготовления среднегабаритных поковок (массой – до 30 кг) с уровнем прочностных свойств (пределов прочности и текучести) на 15–17% выше, чем у зарубежных сплавов-аналогов МА14, ZK60А (США, ЕС), и на 60–70% выше по значениям предела текучести при сжатии.

*Литейные магниевые сплавы* – один из наиболее легких конструкционных материалов. Страны Европы, Китай, Канада, Израиль в настоящее время расширяют использование магния, что обусловлено специальными свойствами сплавов и возможностью снижения массы конструкции.

Основные преимущества литейных магниевых сплавов – это малая плотность (1800–1900 кг/м<sup>3</sup>), высокая удельная прочность, жесткость, виброустойчивость, позволяющие применять литые детали в конструкциях авиакосмической и военной техники, спутниковых систем, энергетических и газоперекачивающих установок, оптических приборов и др.

Ввиду того что магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых сплавов, в 4 раза легче стали и чугуна, их применение дает снижение весовых характеристик изделий на 25–30%.

Россия обладает большими сырьевыми ресурсами для получения магния, производственными мощностями и научным потенциалом.

В процессе реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–3] в рамках комплексного научного направления 10.10. в части литейных магниевых сплавов проведены работы, направленные на разработку технологий изготовления фасонных отливок из современных литейных магниевых сплавов марок ВМЛ18 и ВМЛ20. Исследованы свойства отливок, полученных литьем в разовые формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС) и формы, изготовленные трехмерной печатью, – для деталей системы рулевого управления, внутреннего набора и агрегатов перспективных самолетов и вертолетов.

В рамках комплексного научного направления 8.4. разработки направлены на исследование и создание жаропрочного литейного магниевых сплава нового поколения, легированного редкоземельными металлами с целью повышения предела прочности при температурах эксплуатации от 20 до 250°С.

*Литейные алюминиевые сплавы* широко применяются в различных областях машиностроения благодаря сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости, хорошей технологичности.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве основного материала для исследования рассмотрен жаропрочный сплав ВМД16, содержащий в качестве редкоземельных элементов Y, La, Nd. Механические свойства сплава определены в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9651–84, ГОСТ 11150–84, ГОСТ 25503–80, ГОСТ 3248–81.

Микроструктуры слитков сплава (после гомогенизационного отжига), пресованных прутков  $\varnothing 60$  мм заводского производства и поковок изучены в состоянии поставки – после низкотемпературного рекристаллизационного отжига. Образцы для микроисследования из деформированных полуфабрикатов вырезаны в продольном направлении.

Исследование микроструктуры сплава выполнено на оптическом инвертированном микроскопе DM IRM фирмы Leica и на растровом электронном микроскопе JSM6490-LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа INCA450. В первом случае изображение получали при помощи видеокамеры VEC, подсоединенной к компьютеру, с разрешением 3 мегапикселя. Для анализа и обработки видеоизображений использована отечественная программа Image Expert Pro 3x. На растровом микроскопе фотографии выполнены в режиме СОМРО, изображение в котором формируется обратноотраженными электронами. Его контраст определяется средним атомным номером фазы – чем выше средний атомный номер исследуемой области (фазы), тем светлее данный участок выглядит на фотографии.

Исследование критической температуры фазового превращения проведено методом дифференциального термического анализа (ДТА) на дифференциально-сканирующем калориметре (ДСК) в диапазоне температур от 20 до 500°С со скоростью нагревания 10 К/мин в среде гелия.

В части литейных алюминиевых и магниевых сплавов объектами исследования являлись отливки, изготовленные литьем в кокиль, разовые формы из песчано-глинистой смеси (ПГС) и полученные новыми методами из холоднотвердеющих смесей (ХТС), а также методом трехмерной печати.

Исследование проводили на образцах, вырезанных из отливок литейных алюминиевых (ВАЛ20 и АЛ4МС) и магниевых (коррозионностойкого ВМЛ18, высокопрочного ВМЛ20 и жаропрочного ВМЛ25) сплавов.

Микроструктуру сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 в литом и термообработанном состояниях исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на аппарате «Суперпроб-733» фирмы Jeol (Япония), а

также на растровом электронном микроскопе JSM-840 с энергодисперсионным анализатором Link.

Микроструктуру отливок из сплавов ВАЛ20, АЛ4МС в литом и термообработанном состояниях исследовали на оптическом микроскопе DM IRM фирмы Leica.

Исследование фазового состава и рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku с применением программного обеспечения и базы данных PDF-2.

Исследование коррозионной стойкости литейных магниевых сплавов проводили по ГОСТ 9.913–90.

### **Результаты исследований и обсуждение**

С целью разработки оптимального технологического цикла изготовления поковок из сплава ВМД16 в условиях опытно-промышленного производства исследованы и отработаны температурно-временные параметры литья (обработка расплава перед разливкой, продолжительность выдержки расплава, температура расплава перед заливкой форм, заливка расплава в защитной атмосфере) среднегабаритных слитков из сплава ВМД16 диаметром 350 мм и высотой 500–540 мм. В литом состоянии слитки сплава ВМД16 обладают микроструктурой с выраженной эвтектикой, располагающейся в основном по границам зерен (рис. 1, *а*). Эвтектика состоит из крупных образований, прерывисто декорирующих границы литого зерна. При большом увеличении более заметным становится сложный характер эвтектических составляющих, которые представляют собой как бы многослойные прерывистые выделения.

Поскольку на основе анализа предыдущих исследований установлена необходимость введения промежуточной деформации – прессования прутков, то рассчитали оптимальный диаметр прутка ( $190 \pm 5$  мм) для последующей операцииковки. Партия прутков изготовлена прямым методом прессования из гомогенизированных слитков на горизонтальном гидравлическом прессе с усилием 12000 тс в условиях ОАО «КУМЗ».

Исследована микроструктура прессованных прутков  $\varnothing 60$  мм и доказано, что она существенно отличается от микроструктуры гомогенизированного слитка (рис. 1 *а*, *б*). Деформация вызывает значительное измельчение зерна исходной гомогенизированной заготовки – с 50–70 (рис. 1, *а*) до 8–12 мкм (рис. 1, *б*). Однако при этом сохраняются достаточно крупные фрагменты эвтектической составляющей, которые содержат практически всю гамму легирующих компонентов (рис. 1, *в*). Существенным обстоятельством является то, что температуры фазовых превращений для сплава ВМД16, выявленные по результатам ДТА, достаточно высоки и составляют 442 и 527°С (рис. 2). На основании этих данных и по результатам построения диаграмм

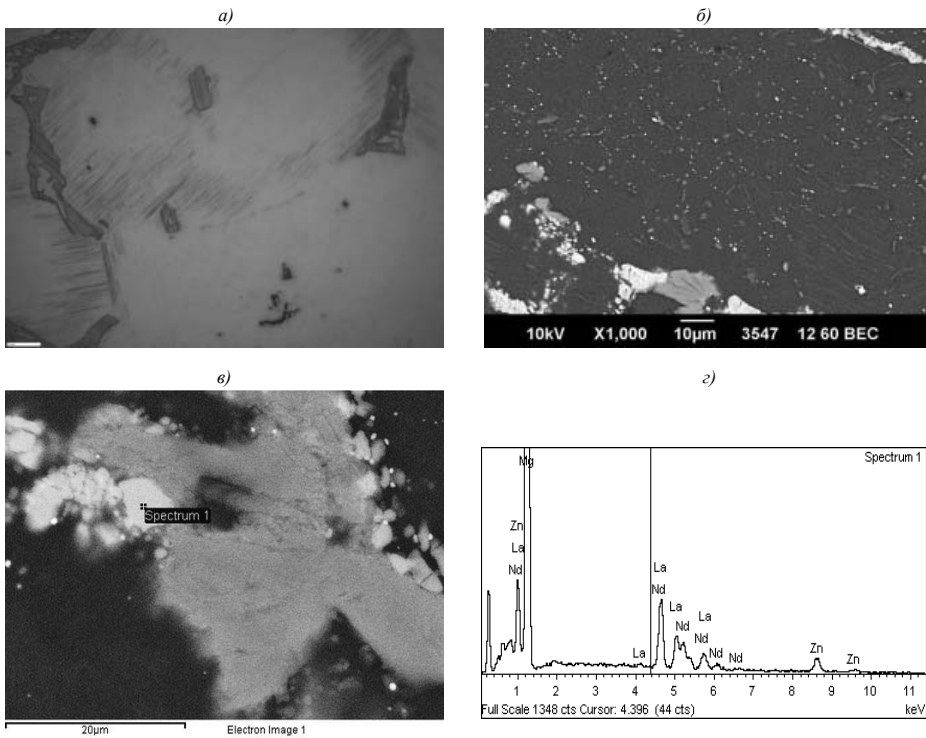


Рис. 1. Особенности микроструктуры и фазового состава сплава ВМД16: *а* – слиток после гомогенизации ( $\times 1000$ ); *б* – прессованный пруток (продольное направление),  $\times 1000$ ; *в* – результаты микрорентгеноспектрального анализа фрагмента эвтектической составляющей (прессованный пруток)

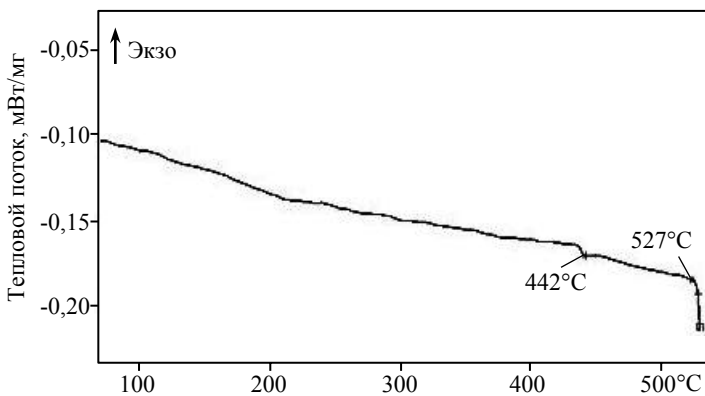


Рис. 2. Результаты дифференциально-термического анализа образцов из магниевого сплава ВМД16

пластичности для образцов из прессованных прутков сплава ВМД16 установлены температурные режимы и предложена окончательная схема изготовления поковки из промежуточного прутка сплава ВМД16. Горячую ковку прессованных промежуточных мерных заготовок провели на ОАО «КУМЗ» на вертикальном гидравлическом прессе с усилием 5000 тс.

Изготовлена партия поволок массой 22–30 кг каждая (рис. 3, а), из которой далее получены детали «кронштейн-качалка» (рис. 3, б).

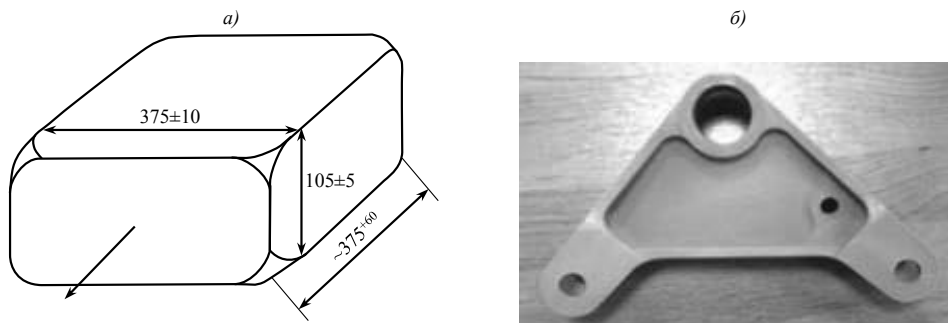


Рис. 3. Схематический чертеж поковки (а) из сплава ВМД16 и внешний вид детали «кронштейн-качалка» (б)

Микроструктура поволок характеризуется отсутствием выраженной текстуры деформации, наличием по границам зерен фрагментов упрочняющей эвтектической составляющей, содержащей РЗЭ, присущей как прессованному прутку, так и поковке (рис. 1, б; рис. 4, а). По результатам предыдущих исследований [9, 11] стехиометрический состав фрагментов эвтектической составляющей можно идентифицировать как  $(Mg, Zn)_5PЗЭ$  (рис. 4, а). В области основного  $\alpha$ -твердого раствора на основе магния четко видны высокодисперсные светлые частицы цирконидов цинка:  $Zn_2(Zr, PЗЭ)_3$  и фазы Лавеса  $Zn_2Zr$  (рис. 4, б).

Благодаря разработанной технологии деформации, а также особенностям структуры и фазового состава нового жаропрочного высокопрочного сплава ВМД16, поковки обладают комплексом повышенных служебных характеристик: предел прочности в интервале  $-70$  до  $+300^\circ\text{C}$  составляет – от 360 до 120–150 МПа; малоцикловая усталость  $\sigma_{\text{пmax}}^{\text{нестто}} = 147$  МПа на базе  $N=90$  кцикл ( $K_f=2,2$ ); предел текучести при сжатии равен 240–250 МПа. Сплав отличается улучшенной коррозионной стойкостью и малой анизотропией прочностных свойств – не более 15–17%. Предел ползучести поволок из сплава ВМД16 при  $150^\circ\text{C}$  на базе 100 ч на 47% выше, чем у отечественного жаропрочного сплава МА12, и в 12,9 раза больше, чем у сплава МА14 при  $125^\circ\text{C}$ . Плотность сплава ВМД16 – не более  $1,83$  г/см<sup>3</sup>.

На сплав ВМД16 и способ его обработки получены патенты.

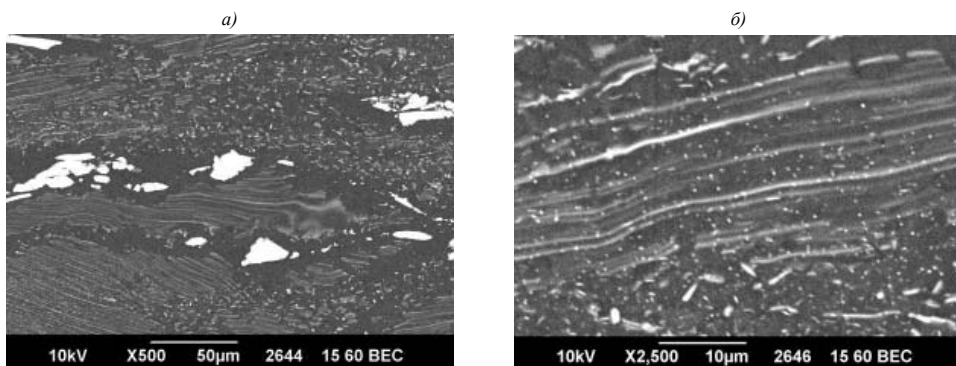


Рис. 4. Характерная микроструктура фазы сплава ВМД16 (поковка) при исследовании на растровом микроскопе:  
*а* – фрагменты эвтектической составляющей;  
*б* – высокодисперсные выделения оксидов цинка

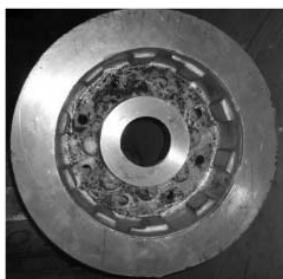
Разработана необходимая нормативная документация. Детали системы управления из поковки высокожаропрочного магниевого сплава ВМД16 успешно прошли стендовые испытания на АО «МВЗ им. М.Л. Миля» и показали преимущества перед сплавом-аналогом марки МА14.

В процессе разработки энерго- и материалосберегающих технологий изготовления сложноконтурных фасонных отливок (массой до 300 кг) из литейных магневых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 применительно к деталям внутреннего набора и агрегатам планера (детали управления, посадочные устройства, корпуса насосов, нагруженные детали, кронштейны, качалки) проведено исследование влияния технологических параметров плавки и литья на формирование структуры, механические и коррозионные свойства литейных магневых сплавов: коррозионностойкого ВМЛ18 ( $\leq 2,5 \text{ см}^3/\text{см}^2$  по водороду) и высокопрочного ВМЛ20 ( $\sigma_B = 300 \text{ МПа}$ ).

В условиях промышленного производства изготовлена опытно-промышленная партия фасонных отливок и образцов из магневых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 (рис. 5), исследованы их микроструктура, механические ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) и коррозионные свойства.

Микроструктура сплава ВМЛ18 системы Mg–Al–Zn (рис. 6) мелкозернистая и состоит в литом состоянии из зерен твердого раствора алюминия, цинка, марганца, кальция, по границам которых расположена псевдоэвтектика ( $\alpha + \text{соединение Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ). После термической обработки по режиму Т4 вторая фаза полностью переходит в твердый раствор, упрочняя его [12]. Механические свойства при растяжении коррозионностойкого сплава ВМЛ18-Т4 составили:  $\sigma_B = 245\text{--}255 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 95\text{--}100 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 6,0\text{--}8,5\%$ ; коррозионная стойкость в 3%-ном растворе NaCl по количеству выделившегося водорода:  $2,4\text{--}2,5 \text{ см}^3/\text{см}^2$  за 48 ч.





Барaban авиаколеса, отлитый в кокиль, из сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 (черновая масса 163,3 кг)



Кронштейн, отлитый в ПГС, из сплава ВМЛ18 (черновая масса 4,8 кг)



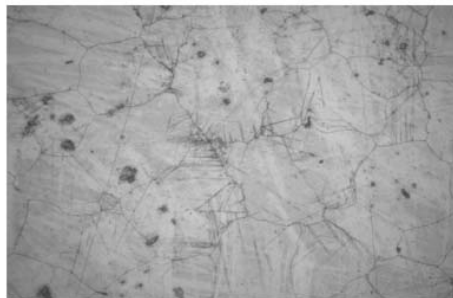
Отсек, отлитый в кокиль, из сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 (черновая масса 176 кг)



Корпус агрегата, отлитый в ПГС, из сплава ВМЛ20 (черновая масса 59 кг)

Рис. 5. Фасонные отливки из литейных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20

*a)*



*б)*

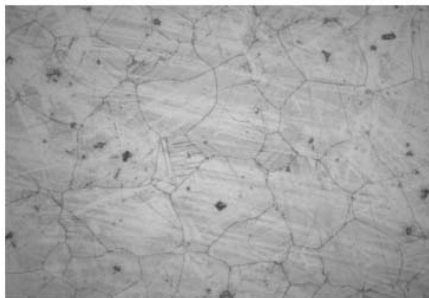


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 200$ ) сплава ВМЛ18-Т4 (отливки изготовлены на ОАО «БЛМЗ»):

*a* – заливка в форму из песчано-глинистой смеси, механические свойства:  $\sigma_B=245$  МПа,  $\sigma_{0,2}=95$  МПа,  $\delta=6,0\%$ ; *б* – заливка в кокиль, механические свойства:  $\sigma_B=250$  МПа,  $\sigma_{0,2}=105$  МПа,  $\delta=5,5\%$

Микроструктура высокопрочного сплава ВМЛ20 системы Mg–Zn–Zr в литом состоянии (рис. 7, а, б) представляет собой зерна твердого раствора цинка, циркония, висмута, кадмия в магнии и цирконидов цинка  $ZnZr$ ,  $Zn_2Zr_3$ ,  $Zn_2Zr$ . После термической обработки по режиму Т61 (рис. 7, в, г) образуется высокодисперсная фаза Лавеса на основе соединения  $Zn_2Zr$ . Размер зерна не превышает 0,04–0,08 мм.

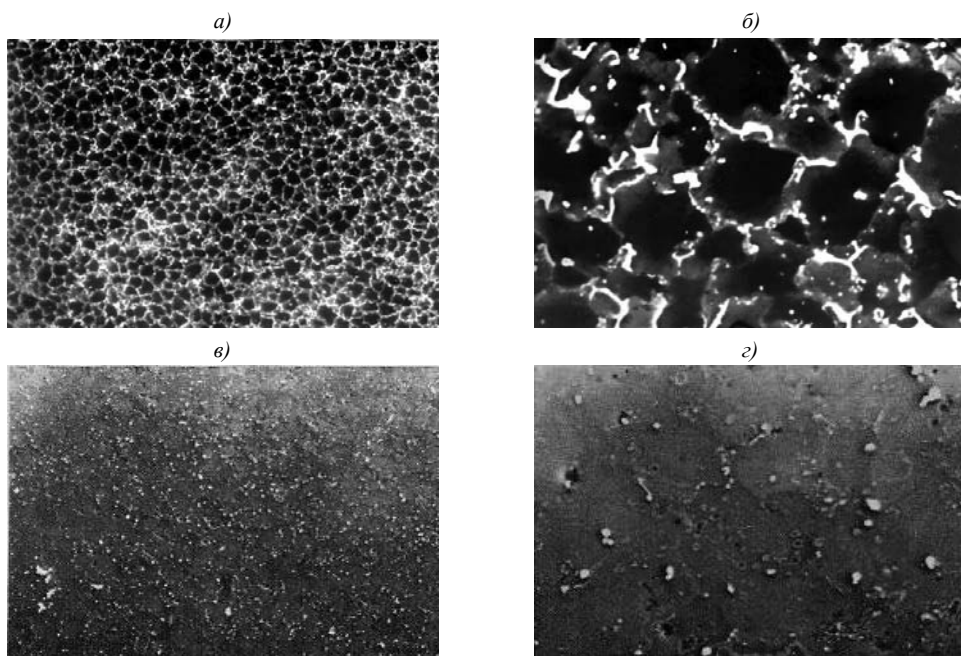


Рис. 7. Микроструктура (а, в –  $\times 100$ ; б, г –  $\times 600$ ) сплава ВМЛ20 в литом (а, б) и термообработанном по режиму Т61 состоянии (в, г)

Механические свойства сплава ВМЛ20 при растяжении составили:  $\sigma_B = 300\text{--}305$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 210\text{--}230$  МПа,  $\delta = 4,5\text{--}5\%$ ; коррозионная стойкость по количеству выделившегося водорода:  $4,3 \text{ см}^3/\text{см}^2$  за 48 ч.

В 2012 г. разработан новый высокопрочный технологичный литейный алюминиевый сплав с оптимальным сочетанием свойств для литья в песчаные формы отливок сложной конфигурации вместо серийного сплава ВАЛ10. Разработанный сплав, получивший марку ВАЛ20, относится к системе Al–Cu–Mg, имеет жидкотекучесть 300 мм, а также повышенные прочность и пластичность по сравнению со сплавами-аналогами: АЛ5 и АЛ9 (Россия), 206.0 (США). Механические свойства сплава:  $\sigma_B \geq 420$  МПа,  $\delta \geq 7\%$ ; область применения – литье фасонных отливок сложной конфигурации для деталей внутреннего набора (корпуса, кронштейны, качалки) [13–14].

С целью разработки технологии изготовления фасонных отливок для деталей системы рулевого управления из современных литейных алюминиевого ВАЛ20 и магниевых ВМЛ18, ВМЛ20 сплавов литьем в разовые формы, полученные новыми методами (из холоднотвердеющих смесей и методом трехмерной печати), проведены патентно-технические исследования.

По результатам патентных исследований выбран тип холоднотвердеющей смеси (процесс Resol-CO<sub>2</sub>), при работе с которой используются компоненты более низкого класса опасности (IV и не опасные). Получен патент на изобретение №2576286 «Холоднотвердеющая смесь для изготовления форм и стержней».

Разработаны технологии изготовления и получены опытно-промышленные партии чушковых сплавов ВАЛ20 и ВМЛ20 в производственных условиях ООО «СОМЗ».

Организацией-соисполнителем ПАО «Туполев» произведен расчет моделей деталей системы рулевого управления («миништурвал», «качалка», «кронштейн», «крышка», «корпус») из современных литейных сплавов ВАЛ20, ВМЛ18 и ВМЛ20.

На основании полученного от ПАО «Туполев» комплекта чертежей деталей рулевого управления разработаны модели отливок с литниково-питающей системой (ЛПС) для двух видов разовых форм: ХТС и изготовленной с помощью трехмерной печати.

По разработанным чертежам изготовлены разовые формы из ХТС по технологии процесса Resol-CO<sub>2</sub> и формы, изготовленные трехмерной печатью на 3D-принтере. Использованы САД программы, в которых начерчена модель отливки с ЛПС [15].

Для сравнения с новыми формами, изготовлены формы из песчано-глинистых смесей (ПГС), в которые заливают серийные детали. Формы из ПГС уступают новым формам по размерной точности, прочности и качеству поверхности.

Отработаны режимы литья (обработка расплава перед разливкой, продолжительность выдержки расплава и снятие шлака перед разливкой, температура расплава перед заливкой форм) для заливки в изготовленные разовые формы – ПГС, ХТС, а также изготовленные методом трехмерной печати. Изготовлены опытно-промышленные партии отливок: «корпус» и «крышка» – из сплава ВАЛ20, «качалка» и «кронштейн» – из сплава ВМЛ20, «миништурвал» – из сплава ВМЛ18, в условиях промышленного производства ОАО «БЛМЗ» (рис. 8).

Разработанные технологии, предназначенные для литья фасонных отливок, в том числе деталей рулевого управления, работающих до 200°С (длительно) и до 250°С (кратковременно), – из сплава ВАЛ20; при

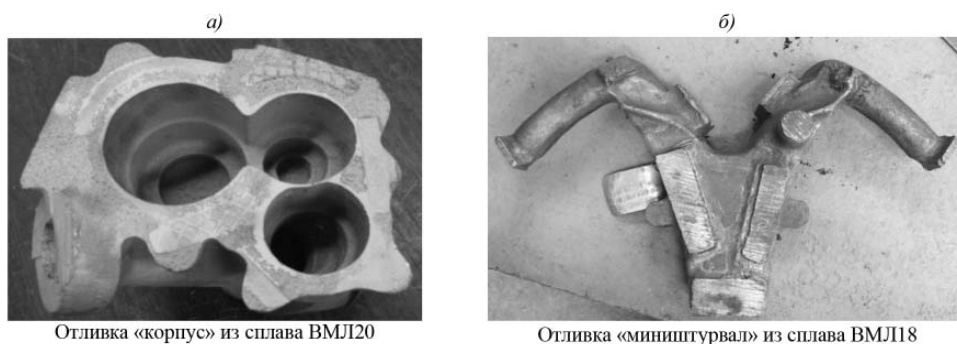


Рис. 8. Отливки из алюминиевого ВАЛ20 и магниевого ВМЛ18 сплавов с применением холоднотвердеющих смесей

температурах от  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$  – для магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20, обеспечивают следующий уровень свойств:

– отливки из алюминиевого сплава ВАЛ20 в состоянии Т5:  
 $\sigma_{\text{в}}=425-440$  МПа,  $\sigma_{0,2}=295-310$  МПа,  $\delta=7,1-7,4\%$ ,  $E=69$  ГПа,  
 $\sigma_{\text{пл}}=270-285$  МПа,  $KCU=38-64$  кДж/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{в}}^{200^{\circ}}=245-260$  МПа,  
 $\sigma_{0,2}^{200^{\circ}}=210-220$  МПа,  $\delta^{200^{\circ}}=12,1-15,2\%$ ,  $\sigma_{100}^{200^{\circ}}=120-130$  МПа,  
 $\sigma_{\text{в}}^{250^{\circ}}=220-230$  МПа,  $\sigma_{0,2}^{250^{\circ}}=210-220$  МПа,  $\delta^{250^{\circ}}=13,4-15,3\%$ ,  
 $\sigma_{100}^{250^{\circ}}=100-110$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}^{300^{\circ}}=155-170$  МПа,  $\sigma_{0,2}^{300^{\circ}}=140-145$  МПа,  
 $\delta^{300^{\circ}}=14,8-18,4\%$ ,  $\sigma_{100}^{300^{\circ}}=60-65$  МПа;

– отливки из магниевого сплава ВМЛ18 в состоянии Т4:  
 $\sigma_{\text{в}}=245-255$  МПа,  $\sigma_{0,2}=95-110$  МПа,  $\delta=2,0-8,0\%$ ,  $KCU=78-96$  кДж/см<sup>2</sup>,  
 $\sigma_{\text{в.сж}}=290-315$  МПа,  $\sigma_{0,2\text{сж}}=95-110$  МПа;

– отливки из магниевого сплава ВМЛ20 в состояниях Т6 и Т61:  
 $\sigma_{\text{в}}=300-320$  МПа,  $\sigma_{0,2}=210-242$  МПа,  $\delta=3,9-6,9\%$ ,  $KCU=45,7$  кДж/см<sup>2</sup>,  
 $\sigma_{\text{в.сж}}=355-408$  МПа,  $\sigma_{0,2\text{сж}}=170-220$  МПа.

Определена шероховатость поверхности отливок, полученных в формы из ХТС и в формы, изготовленные методом трехмерной печати, из алюминиевого (ВАЛ20) и магниевых (ВМЛ18 и ВМЛ20) сплавов. Установлено, что чистота поверхности отливок в 4 раза превышает аналогичные значения при литье в песчано-глинистые формы – с  $R_z=160-320$  мкм до  $R_z=40-60$  мкм.

Разработанные технологии изготовления фасонных отливок из алюминиевого (ВАЛ20) и магниевых (ВМЛ18 и ВМЛ20) сплавов обеспечивают выход годного – до 85%.

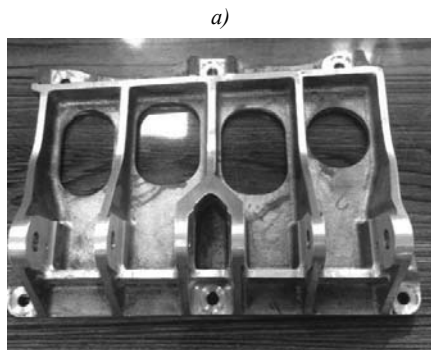
Для оценки качества фасонных отливок из сплавов ВАЛ20, ВМЛ18 и ВМЛ20 составлены альбомы типовых эталонов рентгенограмм газовой пористости и микрорыхлот [16].

С целью разработки технологий получения корпусных разностенных (толщиной – от 8 до 70 мм) фасонных отливок из легких сплавов АЛ4МС и ВМЛ18 с повышенными характеристиками и антикоррозионного защитного покрытия для деталей из магниевых сплавов:

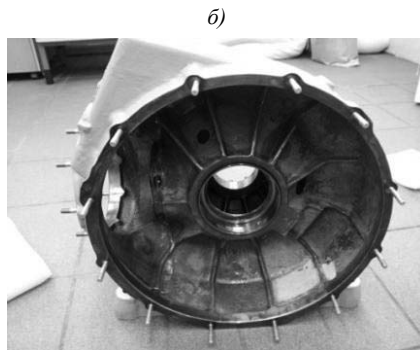
– отработаны технологии получения (температура введения легирующих элементов, продолжительность выдержки расплава при данной температуре, способы рафинирования и модифицирования сплава);

– изготовлены опытно-промышленные партии чушковых сплавов АЛ4МС и ВМЛ18 в производственных условиях ООО «СОМЗ», обеспечившие получение литых заготовок заданного химического состава без металлургических дефектов;

– в условиях промышленного производства изготовлены разностенные корпусные фасонные отливки «кронштейн-корпус», «крышка» из алюминиевого сплава АЛ4МС (на АО «МВЗ им. М.Л. Миля») и «корпус редуктора» из магниевоего сплава ВМЛ18 на ОАО «БЛМЗ» (рис. 9);



Отливка «кронштейн-корпус» из сплава АЛ4МС



Отливка «корпус редуктора» из сплава ВМЛ18

Рис. 9. Модельные детали из алюминиевого АЛ4МС и магниевоего ВМЛ18 сплавов

– разработана технология нанесения суспензионного защитного покрытия на детали из магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМД16, позволяющая получать защитные покрытия с температурой отверждения 110°С, обеспечивающая защитные свойства на уровне 240 ч при экспозиции в КСТ;

– разработаны технологии герметизации разностенных (толщиной – от 8 до 70 мм) корпусных отливок из сплавов АЛ4МС и ВМЛ18, обеспечивающие выход годного – до 80% и снижение энерго- и материалоемкости за счет сокращения циклов пропитки.

По результатам исследований определен уровень свойств отливок:

– из сплава АЛ4МС-Т5:  $\sigma_b \geq 275$  МПа,  $\delta \geq 5\%$ ,  $KCU \geq 49$  кДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_b^{200} \geq 255$  МПа,  $\sigma_b^{250} \geq 190$  МПа;

– из сплава ВМЛ18-Т6 (Т61):  $\sigma_b \geq 245$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 95$  МПа,  $\sigma_{-1} \geq 98$  МПа,  $KCU \geq 78$  кДж/м<sup>2</sup>.

Проведены успешные стендовые испытания модельных деталей из сплавов АЛ4МС («кронштейн-корпус») и ВМЛ18 («редуктор хвостовой трансмиссии»), по завершении которых получены заключения о возможности применения разностенных корпусных фасонных отливок из сплавов АЛ4МС и ВМЛ18 в перспективных изделиях вертолетной техники.

В рамках стратегического направления 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» разработан и паспортизован новый жаропрочный литейный магниевый сплав, легированный РЗМ (Nd–Gd–Yb–Dy), марки ВМЛ25 (системы Mg–РЗМ–Zr). Легирование редкоземельными элементами позволило повысить предел прочности при температурах эксплуатации от 20 до 250°С.

Упрочнение происходит вследствие появления дисперсных частиц, выпадающих из твердого раствора в процессе старения и играющих роль препятствий, тормозящих движение дислокаций в условиях ползучести. Микроструктура жаропрочного литейного магниевого сплава представлена на рис. 10. По границам зерен располагаются укрепляющие их фазы  $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$  и  $\text{Mg}_{12}\text{Nd}$ , устойчивые при высоких температурах [18–20].

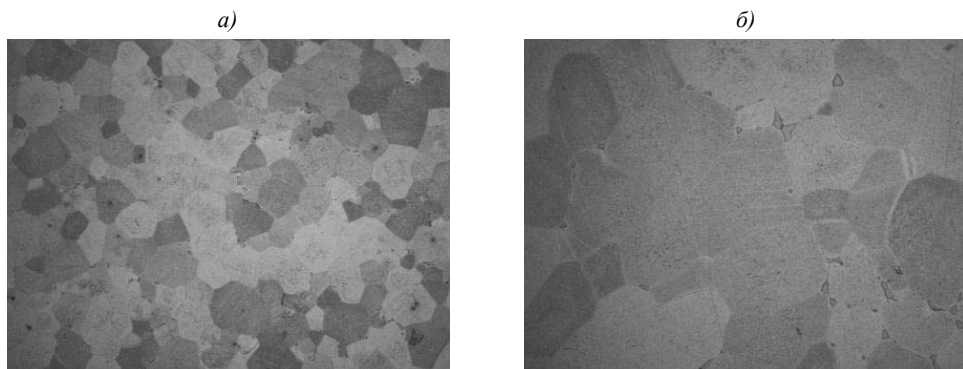


Рис. 10. Микроструктура (*a* –  $\times 200$ ; *b* –  $\times 500$ ) жаропрочного литейного магниевого сплава, легированного РЗМ, марки ВМЛ25-Т61: *a* – после испытания механических свойств при температуре 20°С; *b* – после испытания на длительную прочность при температуре 250°С в течение  $>100$  ч

Разработанные технологии плавки, литья и термической обработки сплава ВМЛ25 обеспечивают предел прочности  $\sigma_B = 270\text{--}280$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} \geq 210$  МПа и предел длительной прочности  $\sigma_{100}^{250} = 100$  МПа. Сплав прошел опробование в промышленных условиях на ОАО «АК «Рубин».

Применение сплава ВМЛ25 позволит обеспечить увеличение срока службы деталей агрегатов и двигателей благодаря повышению прочности (на 15%) и жаропрочности (на 40%) по сравнению с серийным сплавом МЛ10.

## Выводы

В процессе реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.» разработаны:

– жаропрочный и высокопрочный деформируемый магниевый сплав ВМД16 и технологии изготовления поковки (массой 20–30 кг) из него с уровнем прочностных, коррозионных, технологических характеристик, превосходящих соответствующий уровень отечественных и зарубежных аналогов на 15–80%; с коэффициентом анизотропии прочностных свойств в 3,2–3,6 раза меньшим, чем у аналогов;

– высокопрочный технологичный литейный алюминиевый сплав ВАЛ20 системы Al–Cu–Mg с оптимальным сочетанием свойств для литья отливок сложной конфигурации в песчаные формы вместо серийного сплава ВАЛ10;

– жаропрочный литейный магниевый сплав ВМЛ25 и технологии его плавки, литья и термической обработки, гарантирующие высокие механические свойства сплава в интервале температур 20–250°C;

– энерго- и материалосберегающие технологии изготовления сложно-контурных фасонных отливок (массой до 300 кг) из литейных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20, позволяющие увеличить ресурс конструкции и повысить КИМ на 25–30%, снизить энергозатраты на 15–20%;

– формы нового поколения (из холоднотвердеющих смесей (ХТС) и изготовленных методом трехмерной печати), что обеспечивает повышение чистоты поверхности отливок из магниевых и алюминиевых сплавов в 4 раза (до  $R_z=40-60$  мкм) и выход годного – до 85%;

– технологии изготовления фасонных отливок из современных литейных алюминиевого (ВАЛ20) и магниевых (ВМЛ18 и ВМЛ20) сплавов при литье в разовые формы из ХТС и формы, полученные трехмерной печатью, что способствует снижению массы литой заготовки на 10–15%, повышает надежность из-за улучшенных в 1,2–2 раза прочностных характеристик;

– технологии получения корпусных разностенных (толщиной – от 8 до 70 мм) фасонных отливок из легких сплавов АЛ4МС и ВМЛ18 со стабильными прочностными свойствами, при повышении надежности эксплуатации деталей на 25–30% и ресурса в 1,5 раза, а также технологии их герметизации при повышении выхода годного до 80%;

– технология нанесения нового эффективного защитного суспензионного покрытия.

Проведены успешные стендовые (статические) испытания модельных деталей из сплавов ВМД16, АЛ4МС и ВМЛ18 в условиях вертолетного завода.

Разработанные магниевые и алюминиевые сплавы и технологии их

производства предназначены для получения деталей системы управления (качалки, кронштейны, рычаги и т. п.), деталей внутреннего набора, посадочных устройств, корпусов насосов, нагруженных деталей перспективных самолетов (Ту-204СМ, Ил-476) и вертолетов (Ка-52, Ми-35, Ми-38) и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Волкова Е.Ф., Антипов В.В. Магниево деформируемые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 20–26.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.К. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.09.2016).
7. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
8. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
9. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Бецофен С.Я., Акинина М.В. Исследование влияния РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп на свойства магниевых сплавов // Технология легких сплавов. 2014. №2. С.42–48.
10. Волкова Е.Ф. Анализ и итоги Международной конференции «Магний–21. Новые горизонты» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-86-94.
11. Volkova E.F. Some Regular Features of Formation of Phase Composition in a Magnesium Alloy of the Mg–Zn–Zr–Y System // Metal Science and Heat Treatment, 2014. Vol. 55. No. 9–10. P. 477–482.



12. Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 28–34.
13. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 02 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.
14. Гончаренко Е.С., Алябьев И.П., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Получение отливок из сплава ВAl20 путем оптимизации конструкции деталей изделий ОАО «Туполев» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №8. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01. 2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-1-1.
15. Леонов А.А., Дуюнова В.А., Ступак Е.В., Трофимов Н.В. Литье магниевых сплавов в разовые формы, полученные новыми методами // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10. 2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1.
16. Уридия З.П., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Косарина Е.И. Контроль качества литья из магниевых сплавов и способы восстановления герметичности отливок // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-4-4.
17. Гончаренко Е.С., Алябьев И.П., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Технологии получения фасонных отливок из технологичного герметичного сплава АЛ4МС // Литейщик России. 2014. №7. С. 12–16.
18. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов // Литейное производство. 2011. №12. С. 12–14.
19. Рохлин Л.Л. Магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы. М.: Наука, 1980. 192 с.
20. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Фролов А.В., Уридия З.П. Влияние легирования РЗМ на жаропрочность литейных магниевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2014. №5. С. 34–38.