

УДК 669.018.28

Е.В. Белов¹, В.А. Дуюнова¹, А.А. Леонов¹, А.В. Трапезников¹**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И УПРОЧНЕНИЯ
ЛИТЕЙНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СВАРИВАЕМЫХ МАГНАЛИЕВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-11-18

На основании проведенных исследований установлено, что абразивоструйная обработка поверхности отливок из сплавов на основе системы Al–Mg в сочетании с горячим изостатическим прессованием является весьма перспективной стадией технологического процесса изготовления ответственных литых деталей и сварных элементов конструкций, обладающих высокой прочностью, коррозионной стойкостью и герметичностью. Применение предлагаемой комплексной физико-механической обработки отливок из литейного магналия VAL19 при литье в формы из холоднотвердеющей смеси позволяет получить отливки с плотной структурой (I–II балл) и повышенной герметичностью, а также гарантирует повышенный уровень механических свойств.

Ключевые слова: литейные магналии, герметичность, абразивоструйная обработка, горячее изостатическое прессование, плотность, газоусадочная пористость, сквозные дефекты.

E. V. Belov¹, V. A. Duyunova¹, A. A. Leonov¹, A. V. Trapeznikov¹**METHOD OF INCREASING TIGHTNESS AND HARDENING
OF CAST CORROSION-RESISTANT WELDED MAGNALIAS**

Based on the studies, it was found that abrasive treatment of castings surface made from Al–Mg alloys in combination with hot isostatic pressing is a very promising stage of the technological process of manufacturing responsible cast parts and welded structural elements with high strength, corrosion resistance and tightness. Practice of proposed physical and mechanical complex treatment of VAL19 magnalia castings received in cold-box mold allows getting solid structure (I–II point) and high tightness castings, and also guarantee high level of mechanical properties.

Keywords: foundry magnalias, tightness, abrasive treatment, hot isostatic pressing, density, gas-shrink porosity, through defects.

¹Федеральное 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

Введение

Литейные магналии относятся к группе алюминиевых высокопрочных коррозионностойких свариваемых сплавов. На повышение качества отливок из литейных магналиев, помимо легирования, усовершенствования конструкции отливок, применения рациональной технологии плавки и кристаллизации, существенное влияние оказывают физико-механические методы воздействия на материал отливок. Применение этих методов позволяет повысить плотность, механические свойства, качество структуры, а также герметичность отливок из литейных магналиев [1–10].

Недостатком отливок из сплавов на основе системы Al–Mg, полученных при замедленных скоростях кристаллизации (литье в формы на основе песчано-глинистой

смеси (ПГС) и холодно твердеющей смеси (ХТС)), является пониженная герметичность, что связано с особенностями их кристаллизации. В сплавах, затвердевающих в широком интервале температур, выделяются сначала первичные кристаллы, формируя постепенно сплошной каркас, который препятствует питанию жидким металлом образующих пустот. Кроме того, их заполнению расплавом мешает выделяющийся водород, растворимость которого увеличивается в присутствии магния в литейных магналиях [11–13]. В результате образуется равномерно распределенная по всему объему отливки газоусадочная пористость. Отдельные поры могут сообщаться между собой, образуя сквозные дефекты, обуславливающие течь отливок при низких давлениях. Повышенная склонность литейных магналиев к порообразованию является также одним из главных затруднений на пути получения качественных сварных соединений [14].

Герметизация отливок может быть обеспечена пропиткой различными составами в результате заполнения ими сквозных дефектов [15]. Использование данной пропитки имеет существенный недостаток – пропитанные детали нельзя применять в сварных конструкциях. При сварке таких деталей происходит выгорание пропиточного состава, что приводит к образованию в сварном соединении крупных газовых раковин и неметаллических включений. При этом механические свойства сварных соединений снижаются, а сварные конструкции в зоне сварного шва полностью теряют герметичность.

Известно [15], что горячее изостатическое прессование положительно влияет на плотность и механические свойства отливок из алюминиевых сплавов типа силумина, в которых возможно образование рассеянных газовых пор. Эти поры, как правило, изолированы друг от друга и эффективно устраняются в процессе горячего изостатического прессования.

Задачей настоящего исследования является изучение возможности создания герметичных отливок и упрочнения литейных магналиев и их сварных соединений в условиях низкой скорости кристаллизации при литье в формы из песчано-глинистых и холоднотвердеющих смесей.

Повышение герметичности дает возможность определить пути дальнейшего расширения номенклатуры отливок из магналиев и области их применения за счет использования прогрессивных технологических процессов обработки отливок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Для испытания на герметичность использовали отливки типа «полый цилиндр» и «полусфера» (рис. 1). Испытания проводили на пневмоустановке с подачей во внутреннюю полость отливок воздуха под давлением до 0,5 МПа. Испытываемые детали погружали в ванну с водой, подкрашенной хромпиком. Критерием герметичности литой детали являлось давление воздуха, при котором обнаруживалась течь.

Высокотемпературную газостатическую обработку проводили на газостате «Квинтус-40» фирмы АСЕА (Швеция). Обработку поверхности отлитых образцов электрокорундом осуществляли в абразивоструйной камере КСО-130-Н-ФВР-М.

Термическую обработку проводили в печах сопротивления «Накал».

Механические свойства испытывали на разрывной машине Zwick/Roell Z100.

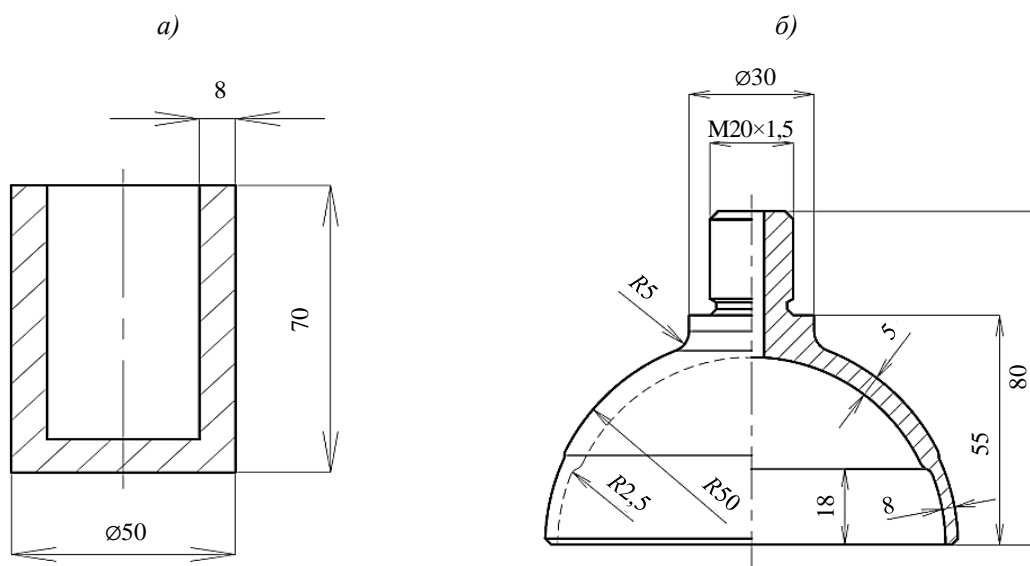


Рис. 1. Отливки для испытаний на герметичность типа «полый цилиндр» (а) и «полусфера» (б)

Металлографическое исследование структуры сплавов проводили на оптическом микроскопе Neophot-32. Фрактографический анализ структуры изломов осуществляли на сканирующем микроскопе JXA-840 с рентгеноспектральным микроанализом.

Для исследования плотности литья и выявления возможных дефектов в ходе работы применяли также неразрушающий радиографический метод контроля с использованием рентгеновских аппаратов.

Результаты и обсуждение

Для исследований выбрали литейный высокопрочный коррозионностойкий сплав ВАЛ19 на основе системы Al–Mg [14], предназначенный для литых деталей и сварных конструкций, работающих в различных климатических зонах. Все образцы из сплава ВАЛ19 термообработали по режиму Т4 (гомогенизирующий отжиг + закалка).

Для проведения исследований по влиянию условий кристаллизации были изготовлены отливки типа «полый цилиндр» в формы из ПГС, формы из ХТС и металлическую форму (кокиль) (рис. 1, а).

В табл. 1 приведены результаты испытания на герметичность отливок в виде полого цилиндра из сплава ВАЛ19, изготовленных различными методами литья и термообработанных по режиму Т4.

Таблица 1

Герметичность отливок из литейного магналия ВАЛ19, термообработанных по режиму Т4, в зависимости от метода литья

Метод литья	Уровень герметичности при давлении, МПа				
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5
ПГС	Течь	Увеличение течи	–	–	–
ХТС	Течи нет		Течь	–	–
Кокиль	Течи нет				

Анализ полученных результатов показывает, что образцы при литье в металлическую форму обладают герметичностью вследствие высокой скорости кристаллизации. При этом отливки имеют плотную мелкозернистую структуру (рис. 2, а).

Отливки, полученные при литье в формы из ПГС и ХТС, имеют низкую герметичность (появление пузырьков воздуха при давлении 0,1 и 0,2 МПа соответственно), несмотря на то, что рентгеновский контроль образцов не выявил наличия недопустимой пористости. Это связано с тем, что при замедленной кристаллизации сплава в отливках образуется мелкодисперсная газоусадочная пористость и увеличивается размер зерна. Некоторые поры и раковины могут сообщаться между собой, образуя сквозные дефекты, обуславливающие пониженную герметичность (рис. 2, б, в). Значительное повышение герметичности отливок, полученных при литье в формы из ПГС и ХТС, может быть достигнуто в результате увеличения скорости кристаллизации и создания направленности затвердевания путем захлаживания массивных участков.

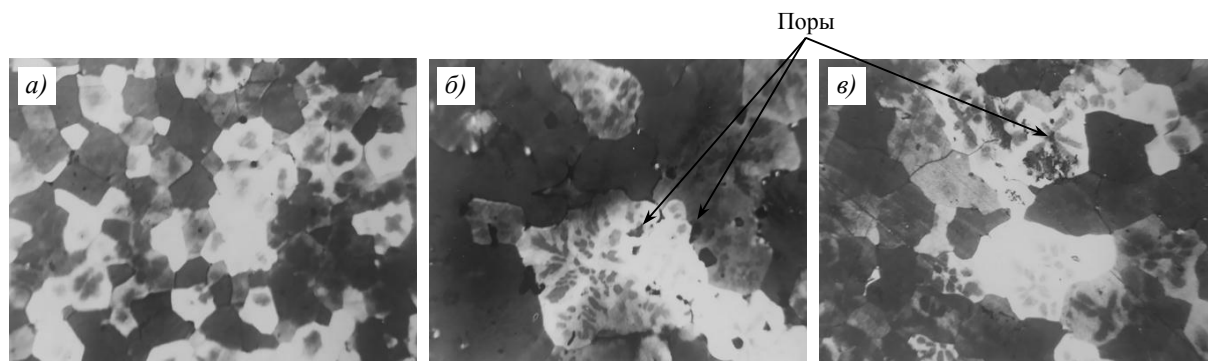


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) сплава ВАЛ19 после термообработки по режиму Т4 в зависимости от метода литья: а – литье в кокиль; б – литье в ПГС; в – литье в ХТС

Возможность повышения герметичности изучали на литых образцах, полученных методом литья в формы из ХТС. С этой целью использовали метод горячего изостатического прессования (ГИП), заключающийся во всестороннем сжатии отливки газами при определенном сочетании температуры, давления и времени выдержки. В процессе ГИП внутренняя газоусадочная пористость и раковины «залечиваются» в результате одновременного воздействия нагрева и давления газа. Это обусловлено тем, что внутренняя поверхность пор сплющивается («спрессовывается») при пластической деформации, а по поверхности раздела возникают силы диффузионного сцепления.

Водород в порах препятствует течению металла в процессе ГИП, но, по-видимому, при суммарном воздействии высоких давления и температуры он в атомарном состоянии переходит в твердый раствор и частично выделяется с поверхности отливки в газовую среду газостата при низком парциальном давлении в ней водорода.

Одним из основных показателей горячего изостатического прессования является температура нагрева, которая не должна превышать температуру солидус. Поэтому температурный режим обработки для отливок каждого сплава зависит от его химического состава. С использованием дифференциального сканирующего калориметра для образцов из сплава ВАЛ19, отлитых в формы на основе ХТС, установлена температура нагрева и выбран следующий режим горячего изостатического прессования: температура нагрева 400 °С, давление 170 МПа, время выдержки 2 ч [15].

Эффективность горячего изостатического прессования оценивали по результатам рентгеновского просвечивания, фрактографического анализа и испытаний механических свойств в сопоставлении с аналогичными данными без ГИП (табл. 2).

Анализ приведенных данных испытаний показывает, что ГИП незначительно повышает свойства литейного магналия ВАЛ19. Это можно объяснить наличием в структуре сквозных дефектов микроскопического размера (до 1 мкм). Образующиеся

сквозные дефекты не залечиваются ГИП, так как давление воздуха в них равно давлению в камере газостата. Поэтому для повышения герметичности отливок со сквозными дефектами требуется специальная предварительная (перед ГИП) обработка их поверхности. С этой целью использовали абразивоструйную обработку поверхности электрокорундом, что позволило устранить сквозные дефекты в результате образования поверхностного наклепанного слоя толщиной $\sim(100-150)$ мкм (рис. 3). При этом повышаются плотность, механические свойства и герметичность литых образцов.

Таблица 2

Влияние горячего изостатического прессования (ГИП) на механические свойства, плотность и герметичность сплава ВАЛ19 при литье в формы из ХТС

Условный номер режима	Режим обработки	Механические свойства			Пористость, балл*	Герметичность, МПа
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$		
		МПа				
1	T4	350–370	220–240	9,0–10,0	III	0,1
2	T4 + ГИП	360–380	230–250	9,5–10,5	II–III	0,15
3	T4 + абразивоструйная снаружи отливки	350–370	220–240	9,0–10,0	III	0,3
4	T4 + абразивоструйная с двух сторон отливки	350–370	220–240	9,0–10,0	III	>0,5
5	T4 + абразивоструйная с двух сторон отливки + ГИП	390–410	240–260	11,5–13,0	I–II	>1,0

* Шкала пористости литейных алюминиевых сплавов.

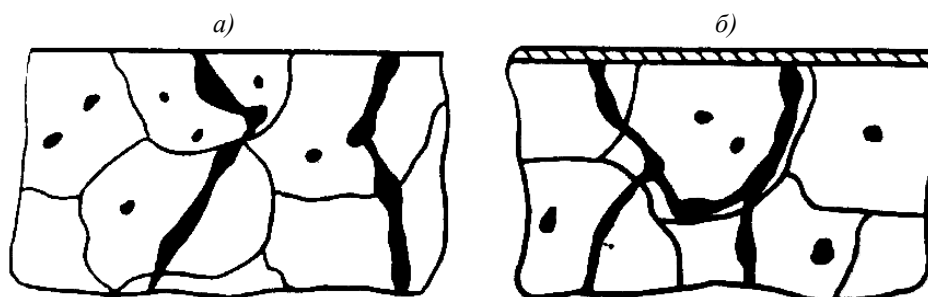


Рис. 3. Схема запрессовки сквозных дефектов в отливке:
а – с литой или снятой коркой; *б* – после абразивоструйной обработки

Исследования также показали, что абразивоструйная обработка электрокорундом практически не влияет на механические свойства отливок из сплава ВАЛ19, однако немного повышает герметичность. Комплексная абразивоструйная обработка внутренней и внешней поверхности отливки электрокорундом и ГИП приводит к максимальному росту прочностных характеристик и герметичности (табл. 2, режим 5).

Роль различных дефектов лучше всего выявляется при анализе изломов. Наличие газоусадочной пористости наглядно демонстрируют изломы образцов сплава ВАЛ19 (рис. 4, *а*), поскольку на шлифе можно обнаружить только лишь отдельные поры (рис. 2). Особенностью подобных фрактограмм является наличие округлых поверхностей и небольших шеек на них. Именно в последних и сосредоточена основная деформация перед разрушением.

Наличие такой пористости, по сути, означает уменьшение «живого» сечения образца. В качественной отливке, при отсутствии газовых пор и раковин, изломы образцов сплава после поверхностного наклепа и ГИП (табл. 2, режим 5) имеют мелкоямочный характер со значительными следами пластической деформации (рис. 4, *б*).

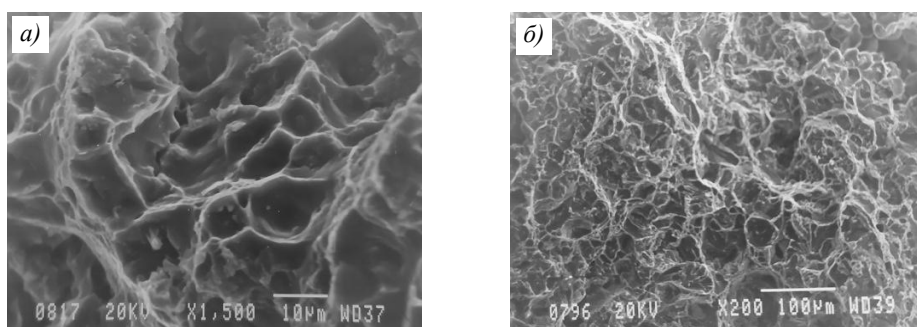


Рис. 4. Влияние пористости на характер излома литейного магналия ВАЛ19: *а* – испытание на растяжение после термообработки по режиму Т4; *б* – испытание на растяжение после технологической обработки (Т4 + поверхностная обработка электрокорундом отливки с двух сторон + ГИП)

Обработанные абразивоструйным способом отливки, в отличие от пропитанных, хорошо свариваются и их можно применять в сварных конструкциях. Положительные результаты получены при сварке литых образцов типа «полусфера» (рис. 5).

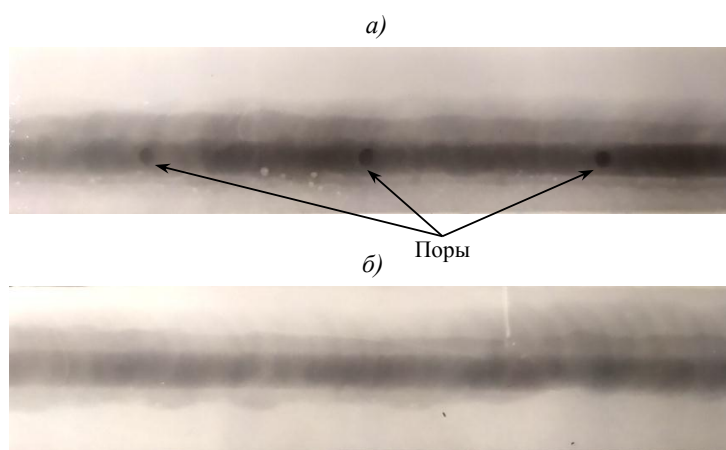


Рис. 5. Сварные швы (рентгеноконтроль) литых образцов типа «полусфера» из сплава ВАЛ19, отлитые в ХТС ($\times 1$): *а* – без обработки в состоянии Т4; *б* – после технологической обработки Т4 + абразивоструйная обработка с двух сторон + ГИП

Качество сварных швов контролировали с помощью рентгеновского просвечивания. В результате сварки отливок типа «полусфера» методом ручной аргоно-дуговой электросварки (АрДЭС: сила тока 115 А, скорость сварки 15 м/ч), термообработанных по режиму Т4, на рентгенограммах появляются поры, имеющие сферическую форму (рис. 5, *а*). Возникновение пористости в околошовной зоне вблизи линии сплавления объясняется процессами термодиффузии водорода в этой зоне, подвергающейся нагреву до температуры жидко-твердого состояния, и формированием микронесплошностей газоусадочного происхождения, объем которых зависит от скорости кристаллизации и при литье в формы из ХТС возрастает. Поэтому, в случае применения отливок из магналиев (сплава ВАЛ19), отлитых в форму из ХТС, получение качественных сварных соединений затруднено.

При использовании абразивоструйной обработки и ГИП (табл. 2, режим 5) достигли высокой плотности отливок (до I–II балла пористости), что обеспечило получение качественных сварных соединений. Рентгеновский контроль показал высокую плотность сварных соединений с применением отливок, полученных по режиму 5 (рис. 5, *б*). В сварном шве и околошовной зоне отсутствуют скопления газовых раковин и пор. В процессе ГИП под воздействием температуры и давления водород будет диффундировать

в твердый раствор сплава, частично растворяясь в нем, и уходить в рабочую среду газостата. Это приводит к снижению газосодержания и плотности материала.

Механические свойства сварных соединений из сплава ВАЛ19 в зависимости от обработки отливок (метод литья – ХТС) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства и герметичность сварных соединений из литейного магния ВАЛ19 в зависимости от режима обработки

Условный номер режима	Режим обработки	Механические свойства		Герметичность, МПа
		σ_B , МПа	δ , %	
1	Без обработки (в состоянии Т4)	320–330	8,0–9,0	0,1
2	Т4 + абразивоструйная с двух сторон отливки + ГИП	350–370	10,0–12,0	>1,0

Анализ приведенных данных показывает, что образование дефектов в высокотемпературной области зоны термического влияния при сварке литейного магния определяется технологией обработки отливок, которая изменяет плотность литья. Сварные соединения из предварительно обработанных отливок, соответствующих I–II баллу пористости, после двухсторонней абразивоструйной обработки и ГИП обладают высокими механическими свойствами и герметичностью (режим 2).

Испытания на общую коррозию проводили при полном погружении вырезанных из отливки образцов в смесь состава: 3%-ный раствор NaCl + 0,1%-ный H₂O₂. Критерием общей коррозионной стойкости служил процент снижения механических свойств после коррозии. Результаты коррозионных испытаний показаны в табл. 4.

Таблица 4

Влияние абразивоструйной обработки и ГИП на коррозионную стойкость отливок

Режим обработки	Механические свойства								
	до коррозии			после коррозии			потери, %		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ
	МПа			МПа					
Т4	350–370	220–240	9,0–10,0	345–365	215–235	8,5–9,5	1,6	2,1	5,7
Т4 + абразивоструйная с двух сторон отливки + ГИП	390–410	240–260	11,5–13,0	385–405	235–255	11,3–12,8	0,8	1,2	1,9

При испытании на общую коррозию установлено, что вырезанные образцы из отливки, полученной методом литья в формы из ХТС и подвергнутой абразивоструйной обработке электрокорундом и ГИП, обладают более высокой общей коррозионной стойкостью. Положительное воздействие комплексной обработки на коррозионную стойкость литейного магния в значительной степени объясняется снижением содержания водорода.

Таким образом, обеспечить герметичность отливок, отлитых в форму из ХТС, и сварных соединений позволяет процесс поверхностной деформационной обработки с последующим горячим изостатическим прессованием, способствующий устранению сквозных микрогазоусадочных каналов и формированию плотного наклепанного слоя.

Заключения

В результате анализа структуры и герметичности литейного коррозионностойкого магния ВАЛ19 с широким интервалом кристаллизации в зависимости от способа литья определен метод повышения герметичности и упрочнения сплава, позволяющий обеспечить высокую плотность отливок, полученных при литье в ХТС.

Применение абразивоструйной обработки поверхности электрокорундом с последующим горячим изостатическим прессованием обеспечивает при литье в ХТС получение отливок с плотной структурой (I–II балл) и повышенной герметичностью. Данный метод обработки гарантирует увеличение временного сопротивления и предела текучести на 10%, а относительного удлинения – более чем на 25%.

Применение поверхностного деформационного наклепа и последующего горячего изостатического прессования позволяет расширить границы применения литых деталей из высокопрочных коррозионноустойчивых свариваемых магналиев и открывает перспективу для расширения их номенклатуры.

Библиографический список

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., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
5. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Иода Е.Н. Сварка плавлением – основа сварочного производства // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 130–143. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-130-143.
6. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. Избранные труды / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2013. 291 с.
7. Hafenstein S., Werner E. Pressure dependence of age-hardenability of aluminum cast alloys and coarsening of precipitates during hot isostatic pressing // *Materials Science & Engineering: A*. 2019. Vol. 757. P. 62–69.
8. Напалков В.И., Махов С.В., Бобрышев Б.Л., Моисеев В.С. Физико-механические процессы рафинирования алюминия и его сплавов / под ред. В.И. Напалкова. М.: Теплотехник, 2011. 496 с.
9. Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. Атлас микроструктур промышленных силуминов. М.: Издательский дом МИСиС, 2009. 204 с.
10. Белов Е.В., Дуюнова В.А., Леонов А.В., Трапезников А.В. Особенности формирования структуры и свойств литейных магналиев при термостабилизирующем отжиге // *Технология машиностроения*. 2019. №12. С. 5–12.
11. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.
12. Engler O., Marioara C.D., Aruga Y. et al. Effect of natural ageing or pre ageing on the evolution of precipitate structure and strength during age hardening of Al–Mg–Si alloy AA 6016 // *Materials Science & Engineering: A*. 2019. Vol. 759. P. 520–529.
13. Кузнецов А.О., Оглодков М.С., Климкина А.А. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2018. №7 (67). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
14. Белов Е.В., Дуюнова В.А., Леонов А.В., Трапезников А.В. Управление структурообразованием и свойствами сварных соединений алюминиевых литодеформированных сплавов с малым удельным весом // *Сварочное производство*. 2019. №7. С. 3–11.
15. Постников Н.С. Упрочнение алюминиевых сплавов и отливок. М.: Металлургия, 1983. 119 с.