

УДК 621.74.02:  
669.018.669.721.5

I.Yu. Mukhina,  
V.A. Duyunova,  
O.V. Koshelev,  
A.O. Koshelev

Аннотация

Summary

## Об устранении металлургических дефектов сложноконтурных отливок из Mg-сплавов

### Peculiarities of the elimination of metallurgical defects in intricate-shaped castings made of Mg alloys

**И.Ю. Мухина, В.А. Дуюнова, О.В. Кошелев, А.О. Кошелев**

Литейные Mg-сплавы применяют для изготовления разностенных фасонных отливок переменного сечения различных областей техники. При изготовлении форм из песчано-глинистых и холоднотвердеющих смесей (ХТС) с использованием стержней разных конфигурации и размеров в ряде случаев возникают металлургические дефекты. Рассмотрены и исследованы способы их устранения: способ заварки и новый перспективный способ газодинамического напыления (ГДН) на дефектные места Mg-отливок тонкодисперсных порошков. Исследованы режимы заварки, свойства сварного шва (СШ) и околошовной зоны (ОШЗ). Даны рекомендации дополнительной термической обработки (ТО) и составам присадочной проволоки. Проведен анализ ГДН Al-порошков, исследовано влияние разных составов порошков на коррозионные свойства, адгезию и герметичность исправленных отливок. Даны рекомендации по применению нового метода.

#### Ключевые слова

Магниевого сплавы, заварка дефектов, магниевые отливки, аргодуговая сварка, присадочный материал, режимы термической обработки, газодинамическое напыление, порошки.

Cast Mg alloys are used to manufacture different-walled shaped castings of variable cross-section applicable in different areas. In the process of production of molds from sandy-clay and cold-hardening mixtures with the use of rods of different shapes and sizes, metallurgical defects can arise in some cases. The ways of their elimination were considered and investigated: welding-up technology and a new promising method of gas-dynamic spraying of fine powders on the defective areas of Mg castings. Welding-up conditions, properties of the weld and heat-affected zone were studied. Recommendations on additional heat treatment conditions and filler wire compositions were offered. The analysis of the gas-dynamic spraying of Al powders was carried out, an influence of different powder compositions on corrosion properties, adhesion and tightness of the healed castings was investigated. Recommendations for the use of the new method were given.

#### Key words

Magnesium alloys, welding defects, magnesium castings, argon-arc welding, filler material, heat treatment conditions, gas-dynamic spraying, powders.

## Введение

Перспективный технологический процесс плавки и литья Mg-сплавов в защитной газовой атмосфере без применения флюсов литье в кокиль с внутренними песчаными стержнями и в формы из ХТС, освоенные на ряде предприятий отрасли, позволяют получать крупногабаритные корпусные отливки для ответственных изделий [1...5].

Как правило, свойства изготавливаемых отливок удовлетворяют требованиям ТУ, но при серийном производстве трудоемких сложноконтурных отливок на отдельных участках в местах наибольших напряжений возможно появление металлургических (литейных) дефектов, устранение которых позволяет повысить выход годного, снизить энергозатраты и применить детали в изделиях [6].

По литературным данным большой объем исследований по исправлению литейных дефектов методом аргонодуговой заварки проводили в 70...90 гг. XX в. В настоящее время для исправления литейных дефектов на Mg-отливках наиболее распространена заварка неплавящимся электродом в среде защитных инертных газов (TIG), сварка плавящимся электродом в среде защитных газов (MIG) и контактная точечная сварка (RSW), сварка трением с перемешиванием.

Актуально изучение влияния внутренних дефектов на разупрочнение мест заварки и особенности технологии заварки литейных дефектов в сложных Mg-отливках с разными толщинами стенок.

На российских предприятиях для литейных Mg-сплавов всех марок используют аргонодуговую сварку (АДС) W-электродом с использованием присадочного материала, которую применяют как до, так и после ТО отливок, а также после их механообработки.

Новый метод устранения литейных дефектов Mg-отливок, опробованный в производственных условиях впервые, – ГДН тонкодисперсных порошков, что особенно перспективно в местах наибольших напряжений при производстве трудоемких сложноконтурных крупногабаритных отливок.

Цель исследований – изучение механизмов устранения дефектов в корпусных сложных Mg-отливках методами заварки и ГДН, исследование физико-химических свойств и разработка эффективной технологии получения качественных Mg-отливок ответственного назначения.

## Методика проведения исследований

Дефекты на крупногабаритных корпусных отливках из сплава МЛ5 заваривали методом АДС

W-электродом. Исследование механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) и микроструктуры сплава проводили на образцах, вырезанных из зон основного материала (ОМ) и СШ корпусных отливок, полученных литьем в кокиль и литьем в песчаные формы после ТО по режимам Т4 и Т6.

ГДН тонкодисперсных Al-порошков на Mg-отливки проводили на установке ДИМЕТ Д 404, с помощью которой можно заделывать трещины, царапины, устранять течи и восстанавливать геометрию детали. Возможно нанесение Al-, Zn-, Cu-, Pb-, Sn- и Ni-покрытий. Для Mg-сплавов такую технологию не применяли.

Для отливок, восстановленных ГДН, определяли:

- уровень адгезии между наносимым покрытием и ОМ;
- влияние наносимых покрытий на коррозионную стойкость ОМ;
- уровень адгезии между напыляемым покрытием и стандартными лакокрасочными покрытиями;

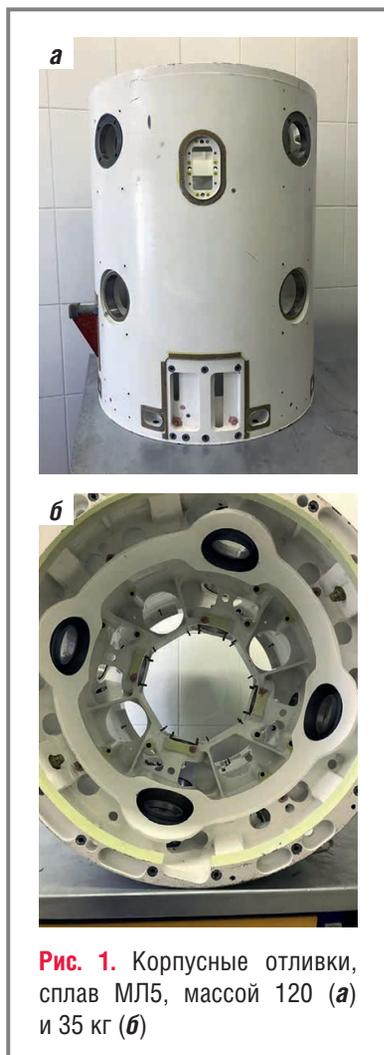
а также проводили:

- рентгеноструктурный фазовый анализ;
- испытания на герметичность;
- механические и статические испытания.

## Результаты исследований и их обсуждение

Ручная АДС – наиболее распространенная технология устранения металлургических дефектов. Для совершенствования и оптимизации этой технологии определяли основные технологические факторы, влияющие на стабильность процесса и свойства в местах заварки дефектов. Исследовали влияние режимов подготовки и предварительного подогрева детали на структуру и механические свойства литой зоны и ОШЗ, а также произведен выбор присадочного материала и режимов сварки.

Различают поверхностные и внутренние дефекты. *Поверхностные* дефекты: засоры, неспаи, неслитины, газовые раковины, утяжины, нарушение геометрии отливки, как правило, выявляются при визуальном осмотре. К *внутренним* дефектам относятся: червоточины, трещины, крупные раковины, ликвационные и шлаковые включения, микрорыхлоты. Их выявляют при рентгеновском контроле или другими современными методами. Для получения качественного сварного соединения, свободного от загрязнений оксидами, применяют защиту расплавленного металла шва и ОШЗ от атмосферного воздуха в виде инертного газа,



**Рис. 1.** Корпусные отливки, сплав МЛ5, массой 120 (а) и 35 кг (б)

аргона или гелия, или жидкого бесхлоридного флюса. Однако применение флюса значительно осложняет процесс заварки дефектов, поэтому предпочитают использование газовой защиты.

При АДС, вследствие образования собственно дефектов в месте подварки в виде горячих трещин, непроваров, окисных плен, W-включений, часто нет необходимой стабильности результатов. *Наиболее склонны к трещинообразованию при заварке отливки с недостаточно плотной структурой и микрорыхлотами.*

Следующий важный момент при сварке – правильно подобранный присадочный материал, в качестве которого для сплавов системы Mg-Al-Zn (МЛ4, МЛ5,

МЛ5пч, ВМЛ18 и др.) используют присадку, изготовленную из ОМ или прессованную проволоку СВ-5. Возможно применение проволоки из деформируемого Mg-сплава той же системы МА5. Также можно использовать импортную прессованную проволоку TIG-395. Для сплавов системы Mg-Zn-Zr (МЛ8, МЛ12, ВМЛ20) применяют сварочную проволоку, содержащую РЗМ. Для тонкостенных отливок, имеющих переплеты и ребра жесткости, применяют проволоку СВ-122, содержащую лантан, или импортную TIG-396.

Метод приготовления присадочного материала влияет на качество заварки дефектов. При использовании литых прутков в ОШЗ и ОМ часто выявляются рыхлоты и трещины. При этом, возможно снижение прочности и относительного удлинения шва заварки отливок на ~ 0,3...0,4%, соответственно. Поэтому при заварке дефектов рекомендуется использовать проволоку, изготовленную прессованием, которая обеспечивает более высокие показатели механических свойств отливок в местах заварки дефектов.

В случае, если процесс сварки замедляется, то в шве и в ОШЗ возможен рост зерна, что, в свою очередь, может быть причиной снижения механических свойств металла этой зоны. Проблема образования горячих

трещин, влияние технологических факторов и присадочного материала на процесс заварки весьма актуальны. При этом, необходимо учитывать технологические и металлургические аспекты процесса. *Технологические особенности* включают выбор оптимальных режимов сварки, предварительный подогрев перед сваркой, режим охлаждения после сварки.

Заварка дефектов сплавов системы Mg-Zn-Zr затруднена не только из-за высокой склонности к окислению, но и в результате повышенной горячеломкости, обусловленной широким интервалом кристаллизации сплавов системы Mg-Zn-Zr, который  $\geq 100^\circ\text{C}$ . Горячеломкость сплавов эвтектического типа, к которым относится наибольшее число высокопрочных литейных Mg-сплавов, тем выше, чем больше эффективность интервала кристаллизации, по степени сужения которого сплавы располагаются следующим образом: МЛ12 (4,5% Zn), МЛ8 (5,5...6% Zn), ВМЛ20 ( $\geq 8,5\%$  Zn) при постоянном содержании Zr – 0,6...0,7%. Показатели горячеломкости, соответственно, составляют 32,5; 30; 27 мм по кольцевой пробе.

По результатам исследований, в **таблице и ниже** приведены свойства ОМ, ОШЗ и СШ после заварки дефектов крупногабаритных отливок из Mg-сплавов

Сплав	Режим ТО до заварки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B^1 / \sigma_B^2$
МЛ12	T1	183/195/225	130/135/140	5,3/5,0/5,5	0,85
МЛ8	T6	230/255/265	158/160/165	4,5/4,8/5,0	0,86
ВМЛ20	T61	255/270/300	210/215/220	4,0/4,5/5,1	0,85

Примечания. 1. СШ/ОШЗ/ОМ. 2. <sup>1</sup> СШ, <sup>2</sup> ОМ.

Режим ТО	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
T4*	$\geq 160$	$\geq 90$	$\geq 2,5$
Литое состояние	195/178	–	4,8/2,8
T4	230/201	91/90	5,5/3,5
T6	220/214	110/111	3,6/3,2

Примечание. ОМ/СШ

\* Место вырезки образцов – верхняя часть корпуса, ОМ

в ТО-состоянии. Полученные характеристики удовлетворяют требованиям конструкторской документации на Mg-отливки. Сплав МЛ5 в настоящее время широко применяют для изготовления отливок сложной гео-

метрии, имеющих значительную разностенность – от 10 до 60 мм. Наиболее часто в отливках этой группы встречаются такие дефекты, как микрорыхлоты разной степени и шлаковые включения, которые в доступных местах могут быть устранены заваркой.

В этом случае применяют присадочный материал в виде пресованной проволоки СВ-5 и другие, указанные **выше** для сплавов системы Mg-Al-Zn.

Механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) и микроструктуру сплава МЛ5 исследовали на образцах, вырезанных из зон ОМ и СШ корпусных отливок, отлитых в кокиль в литом и ТО-состояниях по режиму T4 и T6 (см. **выше** и **рисунки 1...3**). Микроструктура СШ в ТО-состоянии соответствует структуре ОМ, не подвергавшегося подогреву при сварке.

Как видим (см. **выше**), полученные результаты позволяют использовать метод заварки дефектов АДС на отливках из

сплава МЛ5 как в литом, так и в ТО-состояниях в случае выявления дефектов после ТО, с учетом рассмотренных выше особенностей этого процесса.

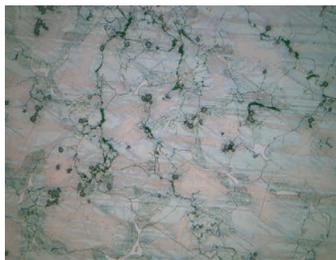
### Устранение литейных дефектов отливок из Mg-сплавов методом ГДН

В качестве материалов для напыления на детали из сплава МЛ5 были выбраны три (1...3) разные по составу высокодисперсные смеси Al-порошка с содержанием: электрокорунда ( $Al_2O_3$ ) 10, 20 и 30% и двуслойное покрытие 4, состоящее из слоя смеси Al-порошка с электрокорундом и слоя чистого Al.

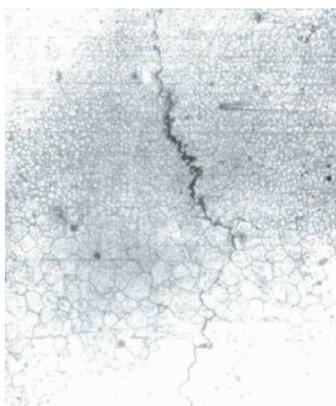
Для определения влияния наносимых покрытий на коррозионную стойкость отливок испытывали образцы с покрытиями, по сравнению с базовыми образцами сплава МЛ5 в состоянии T4.

Испытания коррозионной стойкости показали, что в достаточно жестких условиях базовые образцы без покрытий подверглись коррозионным поражениям, которые составили 25% поверхности. На образцах с напыленными покрытиями 1...4 коррозионных поражений не обнаружено.

Исследовали также взаимодействие нанесенных покрытий с лакокрасочными материалами. Адгезию покрытий опре-



**Рис. 2.** Микроструктура сплава МЛ5, литое состояние,  $\times 200$ . Участок микрорыхлот в ОМ.



**Рис. 3.** Микроструктура заварки на отливки из сплава МЛ12. Присадочный материал СВ122. Образование трещин после заварки



**Рис. 9.** Общий вид излома



**Рис. 5.** Образцы 1...4 сплава МЛ5, Т4 после определения адгезионных свойств напыленных покрытий

деляли на 12 образцах четырех составов в исходном состоянии и после выдержки в воде в течение 14 сут. На **рис. 5** приведены результаты испытаний.

По результатам исследований, адгезия лакокрасочного покрытия не изменяется после 1, 3, 10 и 14 сут. увлажнения и составляет 1 балл для образцов с напылением 1...3. Отслаивание ЛКП наблюдается только на образцах с двуслойным покрытием 4 состава  $Al+10\%Al_2O_3+Al$ -порошок. С увеличением времени испытаний от 1 до 14 сут., отслаивание увеличивается с 2 до 4 балла. Результаты испытаний показывают неэффективность применения покрытия 4.

При сопоставлении экспериментальных значений межплоскостных расстояний и интенсивностей со значениями базы данных определен фактический базовый состав исследуемых напыленных образцов. По фазовому составу образцы идентичны.

По результатам рентгеноструктурного фазового анализа и идентичности фазового состава четырех порошков следует считать оптимальным состав мелкодисперсного  $Al$ -порошка ( $Al+10\%Al_2O_3$ ).

Исследованием микроструктуры образцов сплава МЛ5, Т4

установлено, что микроструктура сплава после напыления – однородная, мелкозернистая и соответствует типичной структуре сплава МЛ5 (**рис. 6**).

После ГДН мелкодисперсной смеси выбранного состава на поверхности образца (отливки или детали) образовался плотный слой толщиной 1,1...4,55 мм. Металлографический анализ позволил выявить в структуре покрытия три зоны: слой собственно покрытия, переходный слой между матрицей (основой сплава) и покрытием и поверхностный слой матрицы сплава.

Структура матрицы образца, при этом, не изменяется. В зоне сцепления покрытия с ОМ (при  $\times 50$  и  $200$ ) несплошностей, пор, разрывов, трещин и других дефектов не обнаружено (**рис. 7**). Покрытие имеет однородную поверхность.

Анализ статистических данных о дефектах Мг-отливок на ряде предприятий показывает, что наиболее распространенные наружные дефекты – это нарушение размеров, неспай, засоры, раковины размером 2...6 мм, недоливы, сколы, внутренние дефекты, обусловленные наличием микрорыхлоты, вызывающие негерметичность отливок.



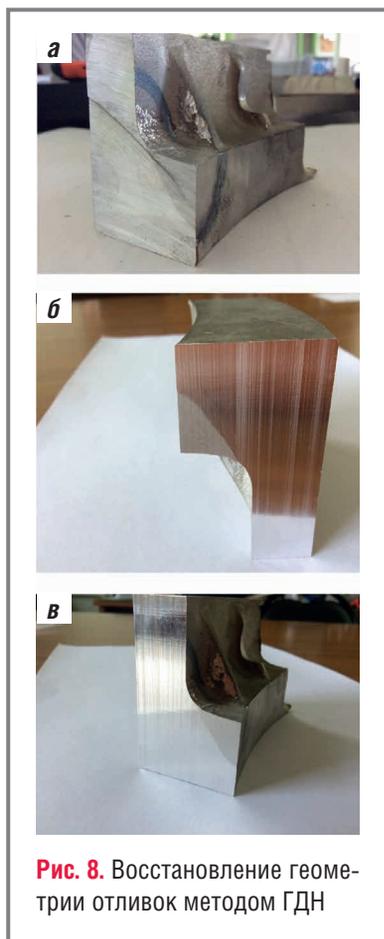
**Рис. 6.** Микроструктура матрицы отливки после напыления, сплав МЛ5, Т4

Для определения возможности восстановления геометрии отливок методом ГДН проведены натурные испытания. Для напыления использовали порошковую смесь, показавшую положительные результаты в предыдущих испытаниях.

Площадь выборки дефектов составляла 3...15 см<sup>2</sup>. Результаты натурального опробования представлены на **рис. 8** (натурное опробование на темплетях,



**Рис. 7.** Структура напыленного слоя: **а** – базовый образец сплава без напыления; **б, в** – зона сцепления напыленного покрытия с ОМ отливки,  $\times 50$ ; толщина напыленного слоя – 1,1...1,2 мм (**б**) и 1,3...1,4 мм (**в**)



**Рис. 8.** Восстановление геометрии отливок методом ГДН

вырезанных из корпусной отливки, сплав МЛ5 Т4).

Процесс восстановления геометрии сложноконтурных корпусных отливок можно применять на ТО-отливках и деталях на разных стадиях механообработки без дополнительного нагрева.

### Влияние напыления на герметичность корпусных отливок

Разработчики проблемы провели опытные работы по выявлению дефекта негерметичности отливок и возможности его устранения с использованием установки ГДН «Димет-404». Негерметичность отливки обусловлена таким металлургическим дефектом, как микрорыхлота разной степени (сквозная по-

ристость), наличие которой при литье практически неизбежно и определяется разностью плотностей жидкого и кристаллизующегося сплава.

Характер микрорыхлоты исследовали на изломах образцов сплава МЛ5, Т4, вырезанных из корпуса отсека 2А, методом фрактографического анализа. Общий вид излома представлен на рис. 9. Дефектная зона имеет размер ~ 0,5...15 мм. На снимках хорошо видны пустоты между участками с микрорыхлотой. Разрушение образца на таких участках происходит с образованием малопластичного рельефа, также могут образовываться хрупкие фасетки оксидов (MgO).

Негерметичность сложноконтурных корпусных отливок, как правило, выявляется после проведения дорогостоящих и трудоемких операций: оксидирования, термической и механической обработок, рентгеноконтроля. Для их обнаружения провели первичную проверку на герметичность согласно действующей на заводе технологии. При испытаниях была выявлена течь на двух дефектных участках корпуса площадью 200×200 и 170×230 мм, после чего произвели их разделку под напыление.

После напыления порошковой Al-смеси на дефектные ме-

ста корпуса проведена повторная проверка на герметичность, показавшая отсутствие течей в местах напыления. Далее была произведена механическая обработка напылённых мест до восстановления номинальных размеров, в соответствии с чертежом отливки, после чего провели окончательную проверку корпуса на герметичность.

Испытания показали отсутствие негерметичности в зонах напыления, что позволяет рекомендовать использование ГДН для устранения негерметичности сложноконтурных отливок из сплава МЛ5.

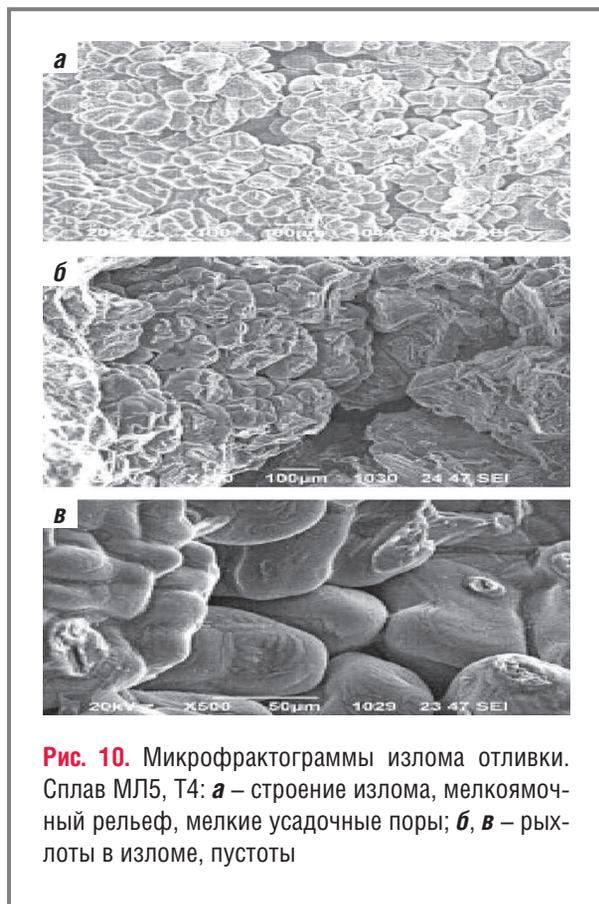
### Исследование механических свойств и проведение статических испытаний

Для исследования физических свойств покрытия, проведения механических испытаний и выбора максимально возможного исправления суммарных дефектов методом напыления были изготовлены плоские и цилиндрические базовые образцы без напыления и экспериментальные образцы с утонением стенки на 25 и 50% от стандартной толщины.

Экспериментальные образцы после утонения доводили до стандартных значений методом ГДН смеси (Al+10%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Толщина напыленного слоя при



**Рис. 9.** Образцы сплава МЛ5, Т4 после испытаний коррозионной стойкости в камере солевого тумана КСТ



**Рис. 10.** Микрофрактограммы излома отливки. Сплав МЛ5, Т4: **а** – строение излома, мелкоячеистый рельеф, мелкие усадочные поры; **б, в** – рыхлоты в изломе, пустоты

25% утонения составляла 2,2; 2,3; 2,4 мм, а при 50% утонении – 4,22...4,55 мм. Средние значения предела прочности плоских базовых образцов без напыления составили 214...220 МПа, цилиндрических образцов – 208 МПа.

При напылении 25% слоя от толщины базового плоского образца  $\sigma_b = 210$  МПа, цилиндрических – 179 МПа. При напылении 50% от толщины базового образца для цилиндрических образцов  $\sigma_b = 115$  МПа. Предел текучести при растяжении практически не изменился при разных толщинах напыленного слоя. Установлено повышение предела текучести при сжатии, в среднем, в 1,5–1,7 раза.

При натуральных статических испытаниях корпусных отливок с дефектами в виде сквозной рыхлоты, устраненными методом ГДН, которые проводили по специальной программе при комплексной комплектации отливок в изделия, разрушения отливок и напыленного слоя не произошло. Отливки сохранили свою герметичность.

*Статические испытания подтвердили требуемый уровень эксплуатационных свойств изделия по герметичности и прочности.*

Работы выполнялись в рамках реализации комплексного научного направления 8.4 «Высокоточные коррозионно-стойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки за период до 2030 г.»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов // *Металлургия машиностроения*. – 2005. – №6. – С. 29–31.
2. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы // *Литейное производство*. – 2013. – №5. – С. 2–5.
3. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Влияние технологических параметров плавки на структуру и свойства новых магниевых сплавов // *Металлургия машиностроения*. – 2014. – №2. – С. 26–29.
4. Мухина И.Ю. Литейные сплавы и техпроцессы при производстве магниевых отливок // *Литейное производство*. – 2003. – №4. – С. 18–19.
5. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов // *Литейное производство*. – 2011. – С. 12–14.
6. Мухина И.Ю., Бобрышев Б.Л., Антипов В.В., Кошелев А.О., Бобрышев Д.Б. Структура и свойства сплавов системы Mg-Al-Zr при литье в кокиль и формы из ХТС // *Литейное производство*. – 2014. – №8. – С. 6–10.

## Сведения об авторах

**Мухина И.Ю.** – канд. техн. наук, нач. сектора «Литейные магниевые сплавы», ФГУП «ВИАМ». E-mail: admin@viam.ru, lab24@viam.ru

**Дуюнова В.А.** – канд. техн. наук, начальник НИО, там же

**Кошелев О.В.** – гл. металлург, АО «ММЗ «Авангард»

**Кошелев А.О.** – начальник лаборатории сварки и пайки, там же