

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-54-65

ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ Порошковых материалов на адгезию лакокрасочных покрытий, коррозию, механические свойства магниевых сплавов

В.А. Дуюнова¹, А.А. Леонов¹, Н.В. Трофимов¹, И.Ю. Мухина¹, З.П. Уридия¹, М.С. Токарев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Литейные магниевые сплавы применяют для изготовления сложноконтурных отливок переменного сечения, при производстве которых возможно появление металлургических дефектов, таких как недоливы, мелкие трещины, надрывы, раковины, микрорыхлоты. Применение газодинамического напыления специальных порошковых композиций без нагрева для устранения указанных дефектов – наиболее экономичный современный технологический метод. Представлены результаты научно-технических исследований в области изготовления порошковых композиций для литейных магниевых сплавов систем Mg–Al–Zn, Mg–Zn–Zr и Mg–REM–Zr.

Ключевые слова: магниевые сплавы, порошковые композиции, газодинамическое напыление, устранение дефектов, адгезия, механические свойства

Для цитирования: Дуюнова В.А., Леонов А.А., Трофимов Н.В., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Токарев М.С. Влияние газодинамического напыления порошковых материалов на адгезию лакокрасочных покрытий, коррозию, механические свойства магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 54–65. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-54-65.

Scientific article

EFFECT OF GAS-DYNAMIC SPRAYING OF POWDER MATERIALS ON THE ADHESION OF PAINT COATINGS, CORROSION, AND MECHANICAL PROPERTIES OF MAGNESIUM ALLOYS

V.A. Duyunova¹, A.A. Leonov¹, N.V. Trofimov¹, I.Yu. Mukhina¹, Z.P. Uridia¹, M.S. Tokarev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Foundry magnesium alloys are used for the manufacture of complex-contoured castings of variable cross-section, during the production of which metallurgical defects may occur, such as underflows, small cracks, tears, shells, and microporosity. The use of gas-dynamic spraying of special powder compositions without heating is the most economical modern technological method to eliminate these defects. The article presents the results of scientific and technical research on the development of powder compositions for casting magnesium alloys of Mg–Al–Zn, Mg–Zn–Zr, Mg–REM–Zr systems.

Keywords: magnesium alloys, powder compositions, gas dynamic spraying, defect elimination, adhesion, mechanical properties

For citation: Duyunova V.A., Leonov A.A., Trofimov N.V., Mukhina I.Yu., Uridia Z.P., Tokarev M.S. Effect of gas-dynamic spraying of powder materials on the adhesion of paint coatings, corrosion, and mechanical properties of magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 54–65. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-54-65.

Введение

Магниевые сплавы находят широкое применение в авиационной, автомобильной, транспортной и оборонной промышленности благодаря низкой плотности, высокой удельной прочности и способности существенно снижать массу конструкций [1]. Тем не менее сложная форма отливок и особенности литейных процессов нередко приводят к возникновению металлургических дефектов, таких как поры, раковины, надрывы, области недоливки и шлаковые включения [2]. Наличие подобных дефектов снижает эксплуатационную надежность изделий и требует применения эффективных технологий их устранения [3–5].

Традиционные методы ремонта, в частности сварка, не всегда позволяют получить необходимый уровень механических и эксплуатационных свойств из-за склонности магниевых сплавов к образованию горячих трещин и изменению структуры [6–8]. Среди современных подходов перспективным является холодное газодинамическое напыление (ХГН) порошковых композиций (ПК) [9–13]. Этот процесс обеспечивает минимальное тепловое воздействие на основной материал, исключает термические деформации и позволяет восстанавливать дефектные области с сохранением свойств магниевых сплавов [14–16]. Несмотря на наличие патентов и отдельных исследований, остается актуальной задача подбора эффективных составов порошков, оптимизации технологии ХГН и комплексной оценки свойств восстановленных участков [17–19].

Цель исследования – разработка эффективных составов и технологии ХГН для восстановления дефектных участков магниевых литейных сплавов, а также комплексная оценка их механических, коррозионных и адгезионных свойств.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов».

Материалы и методы

Для устранения дефектов получали ПК методом распыления (атомизации) и последующего механического легирования. Фракционный состав порошков оптимизировали с помощью аэродинамической сепарации и просева. Исправление дефектов на заготовках и образцах из магниевых сплавов проводили с использованием фракции ПК с размером частиц до 10 мкм. Для отливок из магниевых сплавов ПК по размеру частиц разделены на два класса: первый – до 10 мкм, второй – от 10 до 63 мкм.

Для исправления литейных дефектов и дальнейших исследований выбраны ПК, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Порошковые композиции (ПК) для заготовок, образцов и отливок из магниевых сплавов

Условный номер состава	Система состава ПК	Сплав/система	Класс
1	Al–Mg–Si	ВМЛ18/Mg–Al–Zn	Первый (до 10 мкм), второй (10–63 мкм)
2	Al–Mg–Si–Ti		
3	Al–Mg–Gd	ВМЛ20/Mg–Zn–Zr ВМЛ26/Mg–P3M–Zr	
4	Al–Mg–Y		
5	Al–Mg–Zr		

В качестве объектов исследования использованы литейные магниевые сплавы марок ВМЛ18 (система Mg–Al–Zn), ВМЛ20 (система Mg–Zn–Zr) и ВМЛ26 (система Mg–PЗМ–Zr), выплавленные на индукционной плавильной установке с характерными литейными дефектами (типа пор, раковин). Модельные дефекты формировали в заготовках путем сверления отверстий диаметром 2,5–8,5 мм и глубиной до 3 мм, а также вырезания канавок размером 40×3 мм и глубиной 1,0–1,5 мм (рис. 1 и 2).

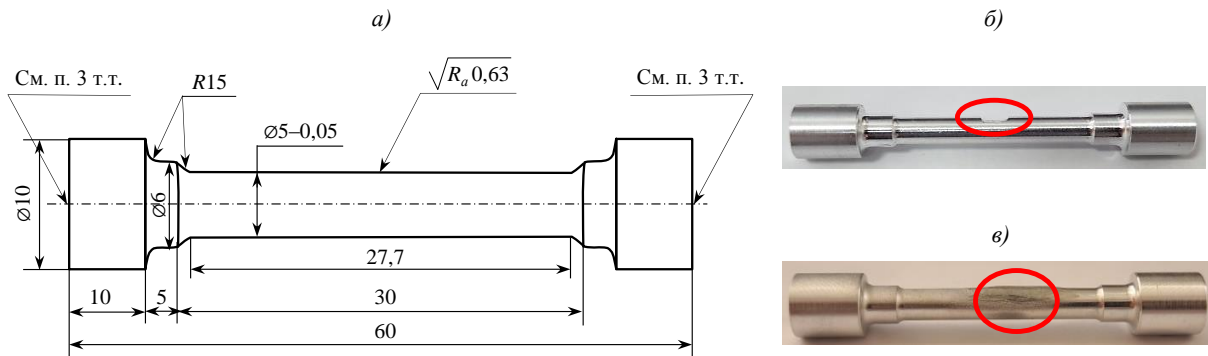


Рис. 1. Эскиз (а) и изготовленные образцы для проведения механических испытаний до (б) и после (е) напыления порошковой композиции

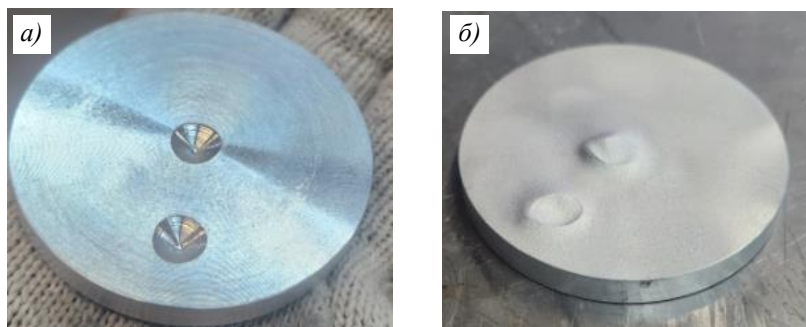


Рис. 2. Изготовленные образцы диаметром 50 мм и толщиной 5 мм для проведения коррозионных испытаний и исследования адгезии лакокрасочного покрытия до (а) и после (б) напыления порошковой композиции

Восстановление проводили методом ХГН с использованием различных ПК на основе систем Al–Mg–Si, Al–Mg–Si–Ti, Al–Mg–Y, Al–Mg–Gd и Al–Mg–Zr. Проведен комплекс исследований: микроструктура изучена с помощью металлографии и оптической микроскопии, механические свойства при растяжении – по ГОСТ 1497–2023, адгезия лакокрасочного покрытия (ЛКП) – по ГОСТ 31149–2014, коррозионная стойкость (испытания в камере соляного тумана (КСТ)) – по ГОСТ 9.912–89.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Исправление литейных дефектов на заготовках и образцах

На основании опыта НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области исправления литейных дефектов методом ХГН с использованием серийных ПК подобраны технологические параметры нанесения выбранных ПК на полученные заготовки из литейных магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26.

Определено качество нанесения ПК различных систем на заготовки. В процессе обработки выявлено, что ПК напылялись на заготовки равномерным слоем, с хорошей адгезией без внешних признаков отслаивания и трещин.

Проведено исправление литейных дефектов на заготовках из литейных магниевых сплавов марок ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 методом ХГН с использованием выбранных ПК.

Для оценки применения технологии ХГН для исправления большой площади дефектов на круглых образцах вырезали канавки размером 40×3 мм, глубиной 1,0–1,5 мм. На углубления напыляли ПК, затем зачищали заподлицо с целью придания образцам одинаковой толщины.

Исследованы микроструктуры (рис. 3–5) участков образцов из сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26, подвергнутых ХГН, на металлографическом комплексе при увеличениях $\times(50-500)$.

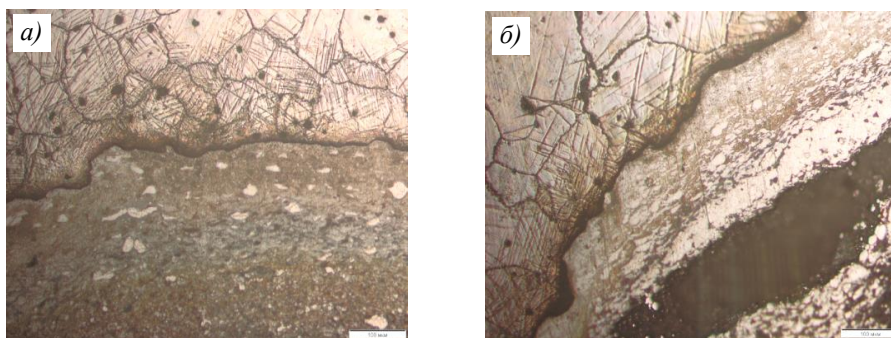


Рис. 3. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ18 с нанесенными порошковыми композициями (фракция частиц размером <10 мкм) составов 1 (а) и 2 (б)



Рис. 4. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ20 с нанесенными порошковыми композициями (фракция частиц размером <10 мкм) составов 3 (а), 4 (б) и 5 (в)

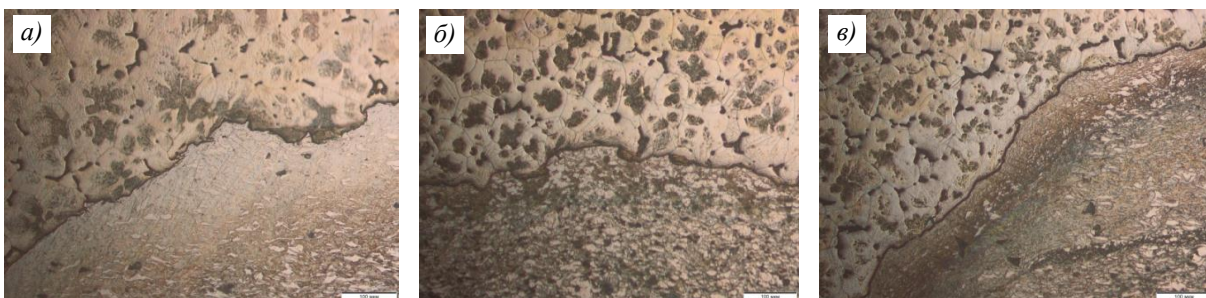


Рис. 5. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ26 с нанесенными порошковыми композициями (фракция частиц размером <10 мкм) составов 3 (а), 4 (б) и 5 (в)

Установлено, что на образцах с напылением ПК составов 1, 3–5 на сплавах ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 порошок плотно прилегает к основному металлу, местами диффундируя в верхний слой основного материала. При использовании ПК состава 2 на границе «порошок–основной металл» выявлены пустоты, что в дальнейшем может привести к отслоению порошка при обработке и нанесении ЛКП.

В табл. 2 приведены механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$) образцов из магниевых сплавов марок ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с устраненными литейными дефектами и без дефектов.

Таблица 2

Механические свойства образцов из литейных магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с устраненными дефектами и без дефектов

Состав порошковой композиции	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{b,нап}/\sigma_{b,осн}$
Сплав ВМЛ18			
Без дефектов	<u>246–258</u> 253	<u>110–121</u> 116	–
1	<u>222–231</u> 226	<u>117–127</u> 121	0,88
2	<u>161–204</u> 187	<u>117–130</u> 123	0,72
Сплав ВМЛ20			
Без дефектов	<u>301–310</u> 306	<u>220–229</u> 225	–
3	<u>230–254</u> 243	<u>137–238</u> 214	0,81
4	<u>264–269</u> 267	<u>228–236</u> 232	0,89
5	<u>166–242</u> 212	<u>135–226</u> 196	0,70
Сплав ВМЛ26			
Без дефектов	<u>308–311</u> 309	<u>220–226</u> 222	–
3	<u>234–252</u> 244	<u>221–238</u> 228	0,79
4	<u>191–290</u> 223	<u>173–221</u> 196	0,72
5	<u>274–281</u> 277	<u>205–226</u> 214	0,90
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение. $\sigma_{b,нап}/\sigma_{b,осн}$ – соотношение прочностей образца с напылением и основного материала.			

По результатам исследования установлено, что соотношение прочностей образца с напылением и основного материала превышает 0,85 для образцов с ПК составов 1 (для сплава ВМЛ18), 4 (для сплава ВМЛ20) и 5 (для сплава ВМЛ26). Для всех остальных образцов это соотношение составило $\leq 0,85$, разрушение образцов происходило в местах напыленных дефектов. Соотношение прочностей является ключевым показателем успешности ремонта мест с дефектами.

Проведены испытания коррозионной стойкости образцов из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с участками, подвергнутыми ХГН, и с нанесенными на них ЛКП в КСТ в течение 720 ч (1 мес.).

Установлено, что на поверхности образцов из сплавов ВМЛ18 с напылением ПК состава 2 (Al–Mg–Si–Ti) и ВМЛ20 с напылением ПК состава 3 (Al–Mg–Gd) наблюдаются

очаги коррозии, что приводит к ухудшению коррозионных свойств (рис. 6). Очаги коррозии образуются в результате разрушения ЛКП и проникновения агрессивной среды к поверхности образца. Коррозионные поражения преимущественно возникают на основном материале (вне зоны напыления).

На остальных образцах коррозионных поражений не обнаружено.

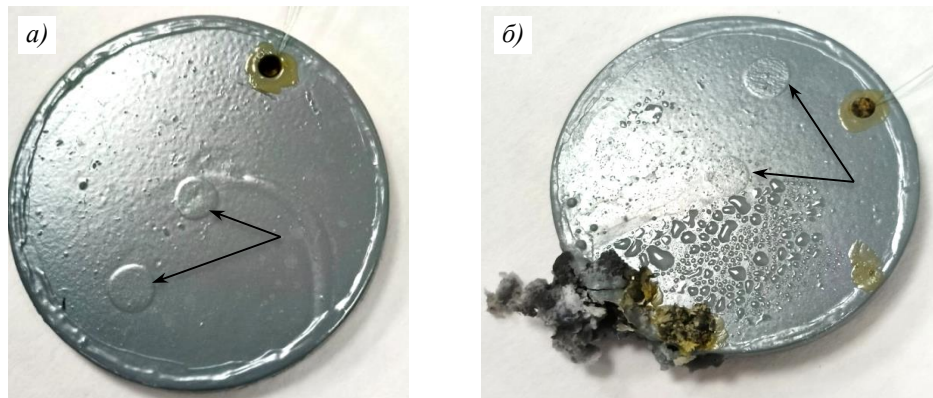


Рис. 6. Образцы из магниевых сплавов после испытания на коррозионную стойкость в камере соляного тумана без коррозионных поражений (а) и с очагом коррозии (б). Места напыления указаны стрелками

Для исправления дефектов отливок можно рекомендовать использование ПК состава 1 (Al–Mg–Si) для сплавов системы Mg–Al–Zn, составов 4 (Al–Mg–Y) и 5 (Al–Mg–Zr) – для сплавов системы Mg–Zn–Zr, составов 3 (Al–Mg–Gd), 4 (Al–Mg–Y) и 5 (Al–Mg–Zr) – для сплавов системы Mg–PЗМ–Zr.

Самое критичное свойство при использовании ХГН – адгезия. Проведены исследования адгезии ЛКП образцов из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с исправленными дефектами (рис. 7). На образцы, подвергнутые предварительному химическому окислению, наносили ЛКП (один слой эмали ЭП-076 и два слоя эмали ЭП-140) в соответствии с ГОСТ 15140–78. Адгезия ЛКП для всех исследованных образцов составила 1 балл.

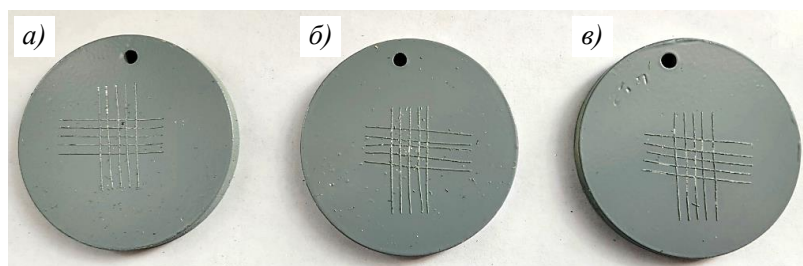


Рис. 7. Образцы из магниевых сплавов ВМЛ18 (а), ВМЛ20 (б) и ВМЛ26 (в) после испытаний на адгезию

По результатам комплекса исследований для литейного магниевых сплава системы Mg–Al–Zn выбрана ПК состава 1, системы Mg–Zn–Zr – состава 4, системы Mg–PЗМ–Zr – состава 5. Определены также технологические параметры изготовления ПК из литейных магниевых сплавов.

Составам ПК, выбранным для магниевых сплавов систем Mg–Al–Zn, Mg–Zn–Zr и Mg–PЗМ–Zr, присвоены марки ВПХ-М1, ВПХ-М2 и ВПХ-М3 соответственно.

Исправление литейных дефектов на отливках

С использованием установки ДИМЕТ модели 405 проведено исправление литейных дефектов методом ХГН на отливках из литейных магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с применением ПК первого и второго классов марок ВПХ-М1, ВПХ-М2 и ВПХ-М3 соответственно. Процесс напыления ПК проходил штатно, порошки ложились ровным слоем, сопло установки не забивалось.

Исследованы микроструктуры образцов, вырезанных из отливок из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с устраненными литейными дефектами с применением ПК марок ВПХ-М1, ВПХ-М2, ВПХ-М3 и без дефектов (рис. 8–10).

Проведенные металлографические исследования показали, что при использовании оптимальных ПК (ВПХ-М1, ВПХ-М2, ВПХ-М3) достигается плотное сцепление напыленного материала с основой, отсутствуют поры, трещины и другие дефекты на границе раздела, наблюдается частичная диффузия элементов порошка в подложку. Для ряда альтернативных составов аналогичные результаты не выявлены, присутствуют определенная рыхлость слоя и склонность к отслоению.

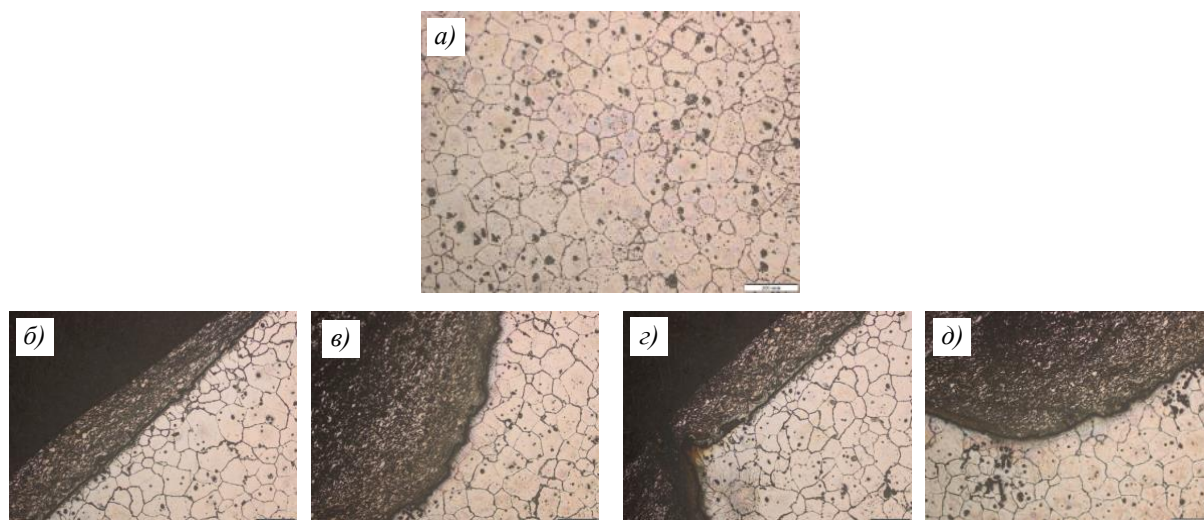


Рис. 8. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ18 без дефектов (а) и с нанесенной порошковой композицией марки ВПХ-М1 первого (б, в) и второго (з, д) классов

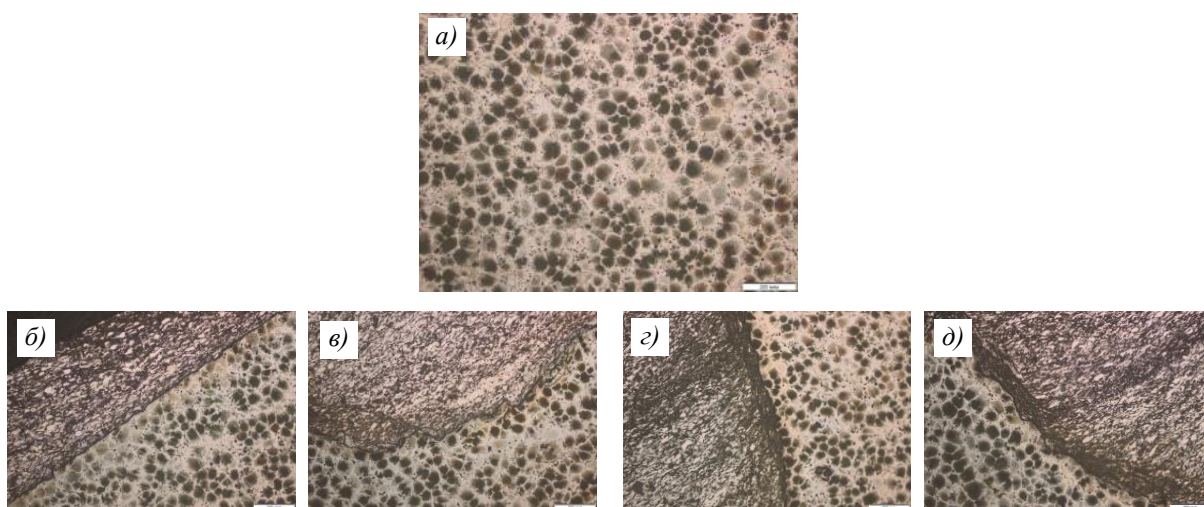


Рис. 9. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ20 без дефектов (а) и с нанесенной порошковой композицией марки ВПХ-М2 первого (б, в) и второго (з, д) классов

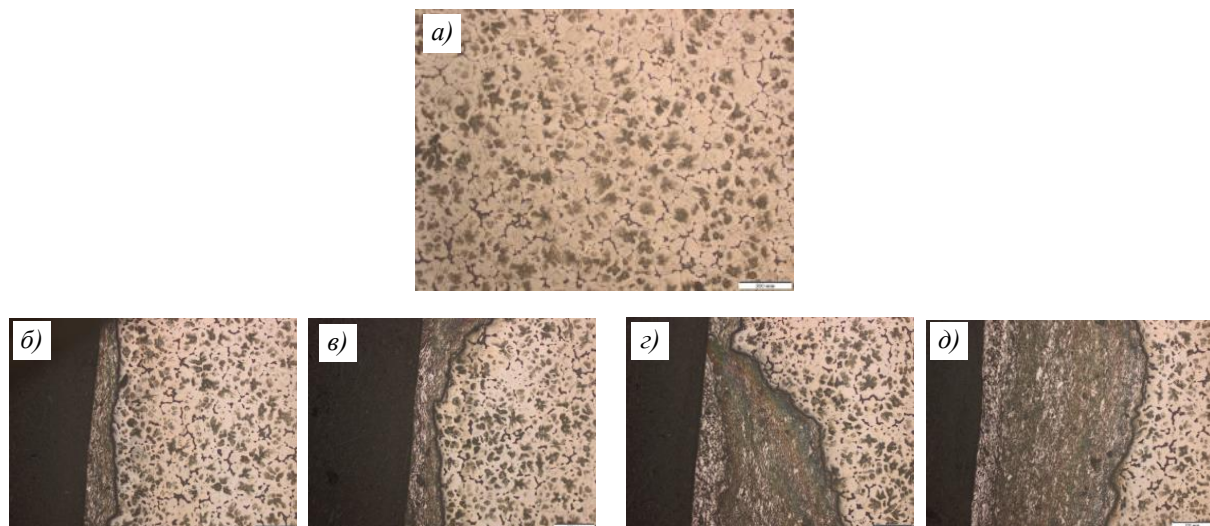


Рис. 10. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ26 без дефектов (а) и с нанесенной порошковой композицией марки ВПХ-М3 первого (б, в) и второго (г, д) классов

В табл. 3 приведены результаты исследования механических свойств (σ_b , $\sigma_{0,2}$) образцов, вырезанных из отливок из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с устраненными литейными дефектами и без дефектов.

Таблица 3

Механические свойства образцов, вырезанных из отливок из литейных магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с устраненными дефектами и без дефектов

Марка порошковой композиции	Класс порошковой композиции	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{b,нап}/\sigma_{b,осн}$
Сплав ВМЛ18				
Без дефектов	–	<u>249–255</u> 252	<u>112–125</u> 118	–
ВПХ-М1	Первый	<u>220–228</u> 223	<u>119–129</u> 124	0,88
	Второй	<u>225–230</u> 228	<u>121–126</u> 123	0,90
Сплав ВМЛ20				
Без дефектов	–	<u>305–310</u> 308	<u>221–230</u> 227	–
ВПХ-М2	Первый	<u>267–270</u> 268	<u>219–233</u> 227	0,87
	Второй	<u>265–267</u> 265	<u>230–236</u> 232	0,86
Сплав ВМЛ26				
Без дефектов	–	<u>308–315</u> 312	<u>226–229</u> 227	–
ВПХ-М3	Первый	<u>269–278</u> 274	<u>210–219</u> 215	0,87
	Второй	<u>269–270</u> 270	<u>209–225</u> 216	0,86
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение. $\sigma_{b,нап}/\sigma_{b,осн}$ – соотношение прочностей образца с напылением и основного материала.				

Механические испытания показали, что для всех исследованных сплавов выбранные ПК обеспечивают прочность наплавленного участка $\geq 85\%$ от прочности исходного материала.

Проведены испытания на коррозионную стойкость образцов (18 шт.) из отливок из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с участками, подвергнутыми ХГН, и с нанесенными на них ЛКП в КСТ в течение 720 ч (4 недели).

Испытания восстановленных образцов продемонстрировали, что применение рекомендованных составов ПК обеспечивает полное отсутствие коррозионных поражений в зонах ремонта даже после 720 ч экспозиции в КСТ (рис. 11).

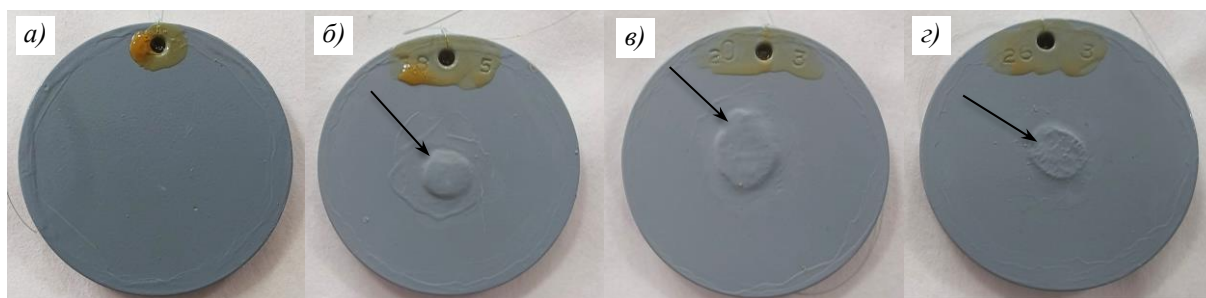


Рис. 11. Образцы после испытаний на коррозионную стойкость сплавов в камере соляного тумана до (а) и после (б–д) напыления. Места напыления указаны стрелками

Исследована адгезия ЛКП. Образцы из отливок из магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20 и ВМЛ26 с исправленными дефектами подвергнуты химическому оксидированию, на них нанесены ЛКП (один слой эмали ЭП-076 и два слоя эмали ЭП-140). Адгезию ЛКП испытывали по методу решетчатых надрезов (рис. 12).

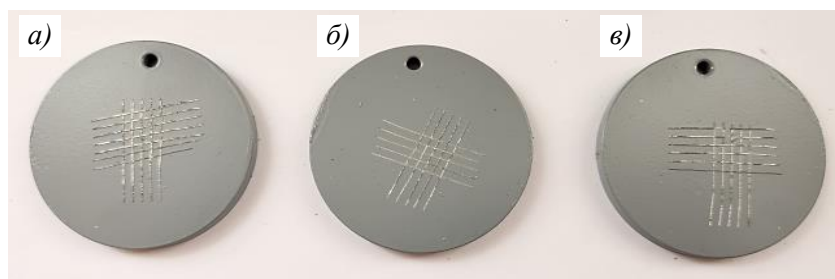


Рис. 12. Образцы из отливок из магниевых сплавов ВМЛ18 (а), ВМЛ20 (б) и ВМЛ26 (в) после испытаний

Оценка адгезии ЛКП показала, что применение ПК марок ВПХ-М1, ВПХ-М2 и ВПХ-М3 позволяет достичь максимального балла по шкале ГОСТ 15140–78, что гарантирует качественную подготовку поверхности под лакокрасочные и антикоррозионные покрытия на дефектных участках.

Заключения

Таким образом, разработанные составы ПК и метод ХГН позволяют эффективно и технологично восстанавливать литейные дефекты изделий из магниевых сплавов.

Технология ХГН с использованием разработанных ПК обеспечивает сохранение механических и коррозионных характеристик, а также высокую адгезию защитных покрытий.

Результаты работы можно использовать для совершенствования ремонтных технологий в промышленности. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются масштабирование процесса для крупногабаритных изделий и расширение спектра применяемых систем ПК.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
3. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). С. 24–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
5. Кечин В.А. Пути повышения эффективности применения магниевых сплавов // Литейщик России. 2008. № 7. С. 17–20.
6. Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуюнова В.А., Токарев М.С. Современные подходы к повышению качества литья и локальному ремонту изделий из магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). С. 57–69. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.
7. Du Z., Peng Y., Teng H. et al. Formation and growth of precipitates in a Mg–7Gd–5Y–1Nd–2Zn–0,5Zr alloy aged at 200 °C // Journal of Magnesium Alloys. 2022. Vol. 13 (3). P. 1–14. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
8. Рохлин Л.Л. Закономерности влияния различных редкоземельных металлов в магниевых сплавах на их прочностные свойства // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3 (34). С. 38–44.
9. Мухина И.Ю., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Ростовцева А.С. Развитие ресурсосберегающих технологических процессов в металлургии магния // Металлы. 2021. № 6. С. 16–24.
10. Истомина А.В. Исследование распределения нанопорошка оксида алюминия в полимерном растворе // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 78–88. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-78-88.
11. Salehi M., Maleksaeedi S., Sapari M.A.B. et al. Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing // Materials Desing. 2019. No. 169. P. 115–124.
12. Takagi H., Sasahara H., Abe T. et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. No. 24. P. 498–507.
13. Knezovis N., Topis A. Additive production of wire and arc – new achievement in production. Cham: Springer international publishing, 2019. P. 65–71.
14. Bachurin N., Stepakin V., Buryak E. Gas-Dynamic spraying in the restoration of machine parts // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 4 (168). P. 42–45.
15. Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Восстановление внутренних поверхностей цилиндрических деталей малых диаметров холодным газодинамическим напылением // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 128–136.

16. Nefedov N.I., Guseva M.A., Khaskov M.A. et al. Peculiarities of temperature behavior of low-molecular fluorooligomers // *Polymer Sciences. Series A*. 2017. Vol. 59. P. 496–505. DOI: 10.1134/S0965545X17040034.
17. Javid A., Czerwinski F. Progress in twin roll casting of magnesium alloys: A review // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. No. 9. P. 362–391.
18. Бобрышев Б.Л., Моисеев В.С., Александрова Ю.П. Совершенствование комплексной обработки магниевых сплавов при плавке // *Технологии легких сплавов*. 2021. № 3. С. 35–44.
19. Kipouros G.J., Sadoway D.R. Removal of Ca from Magnesium melt by Flux Refining // *Materials Transactions*. 2016. Vol. 57. P. 1156–1164. DOI: 10.1016/S1471-5317(01)00004-9.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kuttyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
3. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 24–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 26, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
5. Kechin V.A. Ways to improve the efficiency of magnesium alloys. *Liteyshchik Rossii*, 2008, no. 7, pp. 17–20.
6. Trofimov N.V., Leonov A.A., Duyunova V.A., Tokarev M.S. Modern approaches to improving the quality of casting and local repairs of products made of magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), pp. 57–69. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.
7. Du Z., Peng Y., Teng H. et al. Formation and growth of precipitates in a Mg–7Gd–5Y–1Nd–2Zn–0.5Zr alloy aged at 200 °C. *Journal of Magnesium Alloys*, 2022, vol. 13 (3), pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
8. Rokhlin L.L. Patterns of influence of various rare earth metals in magnesium alloys on their strength properties. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»*, 2020, no. 3 (34), pp. 38–44.
9. Mukhina I.Yu., Trofimov N.V., Leonov A.A., Rostovtseva A.S. Development of resource-saving technological processes in magnesium metallurgy. *Metally*, 2021, no. 6, pp. 16–24.
10. Istomin A.V. Study of the distribution of aluminum oxide nanopowder in a polymer solution. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 78–88. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-78-88.
11. Salehi M., Maleksaeedi S., Sapari M.A.B. et al. Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing. *Materials Desing*, 2019, no. 169, pp. 115–124.
12. Takagi H., Sasahara H., Abe T. et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, no. 24, pp. 498–507.
13. Knezovis N., Topis A. *Additive production of wire and arc – new achievement in production*. Cham: Springer international publishing, 2019, pp. 65–71.
14. Bachurin N., Stepakin V., Buryak E. Gas-Dynamic spraying in the restoration of machine parts. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2024, no. 4 (168), pp. 42–45.

15. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A. Restoration of internal surfaces of small-diameter cylindrical parts by cold gas-dynamic spraying. *Tekhnicheskiiy servis mashin*, 2020, no. 3 (140), pp. 128–136.
16. Nefedov N.I., Guseva M.A., Khaskov M.A. et al. Peculiarities of temperature behavior of low-molecular fluorooligomers. *Polymer Sciences. Series A*, 2017, vol. 59, pp. 496–505. DOI: 10/1134/S0965545X17040034.
17. Javaid A., Czerwinski F. Progress in twin roll casting of magnesium alloys: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, no. 9, pp. 362–391.
18. Bobryshev B.L., Moiseev V.S., Aleksandrova Yu.P. Improvement of complex processing of magnesium alloys during melting. *Tekhnologii legkikh splavov*, 2021, no. 3, pp. 35–44.
19. Kipouros G.J., Sadoway D.R. Removal of Ca from Magnesium melt by Flux Refining. *Materials Transactions*, 2016, vol. 57, pp. 1156–1164. DOI: 10.1016/S1471-5317(01)00004-9.

Информация об авторах

Дуюнова Виктория Александровна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Трофимов Николай Вадимович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мухина Инна Юрьевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Уридия Зинаида Петровна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Токарев Максим Сергеевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Victoria A. Duyunova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Leonov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay V. Trofimov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Inna Yu. Mukhina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Zinaida P. Uridia, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim S. Tokarev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.09.2025.
The article was submitted 15.09.2025; approved and accepted for publication after reviewing 23.09.2025.