

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ И ЛОКАЛЬНОМУ РЕМОНТУ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Н.В. Трофимов¹, А.А. Леонов¹, В.А. Дуюнова¹, М.С. Токарев¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований технологии устранения литейных дефектов методом холодного газодинамического напыления серийных магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 с использованием серийных порошков. Исследовано влияние порошковых композиций на механические свойства и адгезию. Рассмотрены результаты исследований образцов и отливок магниевого сплава ВМЛ26, полученных по различным режимам выплавки. Выбран режим выплавки магниевого сплава ВМЛ26 на индукционной плавильной установке. Исследованы микроструктура, химический состав и механические свойства образцов из магниевых сплавов.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, фильтрация, магниевые сплавы, порошки, сила тока индуктора

Для цитирования: 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). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.

Scientific article

MODERN APPROACHES TO IMPROVING THE QUALITY OF CASTING AND LOCAL REPAIRS OF PRODUCTS MADE OF MAGNESIUM ALLOYS

N.V. Trofimov¹, A.A. Leonov¹, V.A. Dyunova¹, 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. The article presents the results of research on the technology of eliminating casting defects by cold gas-dynamic spraying of serial magnesium alloys ML5hp and ML10 using serial powders. The influence of powder compositions on mechanical properties and adhesion has been studied. The results of studies of samples and castings of magnesium alloy VML26 obtained under various smelting modes are considered. The mode of smelting of magnesium alloy VML26 in the induction melting unit is selected. The microstructure, chemical composition, and mechanical properties of magnesium alloy samples were studied.

Keywords: cold gas dynamic spraying, filtration, magnesium alloys, powders, inductor current

For citation: Trofimov N.V., Leonov A.A., Dyunova 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), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.

Введение

В настоящее время в промышленности предъявляют высокие требования к изделиям в части увеличения ресурса и срока сервисного обслуживания, что возможно только при использовании качественных материалов. Повысить эксплуатационные характеристики литых деталей из магниевых сплавов можно путем усовершенствования имеющихся технологий и разработки новых технологических подходов.

При выплавке и механической обработке отливок встречаются поверхностные дефекты, которые необходимо устранять. Одним из перспективных направлений является локальный ремонт отливок и деталей с использованием порошка методом холодного газодинамического напыления (ХГН) как в процессе производства деталей, так и при ремонте готового изделия [1–3].

Метод ХГН – это перспективный способ устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров отливок и деталей из магниевых сплавов. При механической обработке магниевых сплавов внутренние дефекты могут становиться поверхностными. В процессе эксплуатации может возникать деградация поверхности детали. Метод ХГН позволяет оперативно в кратчайшие сроки устранить дефекты: в процессе напыления при ударах нерасплавленных металлических частиц о место дефекта происходит их пластическая деформация, и дефект послойно заполняется.

Кроме того, метод ХГН можно использовать для герметизации отливок и деталей, подверженных воздействию различных жидкостей и масел. В связи с этим активно ведется разработка новых порошковых материалов и технологий их напыления [4–6].

Одним из способов повышения качества магниевых сплавов является фильтрация расплава, применяемая для удаления оставшихся нежелательных примесей (неметаллических и шлаковых включений). Для этого используются различные фильтры и сетки. Кроме того, применяется метод флотации, при котором расплавленный магниевый сплав продувается газом, например аргоном или гелием. В результате происходит прилипание частиц оксидов, хлоридов, неметаллических включений к газовым пузырькам, которые выносят их на поверхность и в дальнейшем удаляются вместе с образующимся шлаком. Однако фильтрации не всегда уделяют должное внимание, что приводит к получению различного рода дефектов [7–10].

Фильтрация позволяет улучшить структуру и механические свойства сплава, уменьшить количество дефектов внутри и на поверхности изделий. Это повышает надежность и долговечность изделий, что особенно важно в производстве ответственных изделий авиационной техники [11–13].

Для изготовления фильтров для магниевых сплавов используют материалы с высокой термостойкостью. К таким материалам относятся кварц, стекловолокно, керамика и стальные сетки. Керамические фильтры обычно изготавливают из оксида алюминия, оксида циркония или карбида кремния. Кварцевые фильтры также являются эффективными при фильтрации магниевых сплавов, так как они обладают высокой термостойкостью и химической инертностью. Выбор типа фильтра зависит от состава магниевого сплава, процесса литья и требований к качеству конечного продукта. Керамические фильтры обычно используют для магниевых сплавов, содержащих высокую концентрацию соединений оксида циркония, поскольку они могут улавливать эти включения. Металлические фильтры могут быть более эффективными для удаления шлаковых примесей [14–17].

Фильтрация магниевых сплавов является важным этапом производства, который позволяет получить чистый и высококачественный продукт, а также может повысить производительность.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых

сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

В качестве материалов использовали магниевые сплавы марок МЛ5пч (системы Mg–Al–Zn), МЛ10 и ВМЛ26 (системы Mg–PЗМ–Zr). Сплавы выплавляли с использованием индукционной печи в защитной газовой среде, состоящей из смеси элегаза и углекислого газа.

Для устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров использовали установку ДИМЕТ-405 и порошки марок А-80, А-20.

Испытания на растяжение образцов из магниевых сплавов проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Химический состав определяли методом атомно-эмиссионного анализа в соответствии с ГОСТ 3240.0–3240.21–76, МИ 1.2.078 и МИ 1.2.079, коррозионную стойкость – по ГОСТ 9.913–90, адгезию лакокрасочных покрытий – по ГОСТ 15140–78.

Микроструктуру образцов исследовали в соответствии с МР 21-31–85 и ГОСТ Р ИСО 22309–2015 с помощью просвечивающего электронного микроскопа с термополюсным катодом типа Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемку проводили в сканирующем режиме с применением светлопольного (BF) и высокоуглового кольцевого темнопольного (HAADF) детекторов. Съемку электронных дифракций в сходящемся пучке осуществляли с помощью нижней CCD-камеры. Локальный химический анализ структурных составляющих проводили рентгеноспектральным методом с использованием энергодисперсионного спектрометра. Обработку результатов исследований и подбор кристаллической решетки интерметаллидных соединений осуществляли с помощью специализированного программного обеспечения.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Устранение литейных дефектов и восстановление геометрических размеров

Для устранения литейных дефектов методом ХГН на отливках из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 изготавливали литейные формы и стержни. В качестве основы для изготовления литейных форм и стержней выбран кварцевый песок с высокой однородностью и средним размером зерна 0,16–0,25 мм марки 2К2О102 по ГОСТ 2138–91. В качестве смолы использовали фенолформальдегидную смолу марки АСП-Н и отвердитель марки АМС-10. Формы и стержни изготовлены с применением литейной оснастки для получения отливок «Корпус» на формовочном комплексе. Полученные формы, стержни и отливки представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Верхние и нижние полуформы отливки «Корпус» со стержнями



Рис. 2. Отливки «Корпус» из сплавов МЛ10 (а) и МЛ5пч (б)

Проведены исследования химического состава серийных сплавов МЛ5пч и МЛ10, по результатам которых установлено их полное соответствие ГОСТ 2856–79 по содержанию основных элементов и примесей. Отливки из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 прошли термическую обработку по режимам Т4 и Т6 соответственно.

Исследованы механические свойства отдельно отлитых образцов из сплавов МЛ5пч и МЛ10 на соответствие ГОСТ 2856–79 (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства отдельно отлитых образцов из сплавов МЛ5пч и МЛ10

Сплав	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
МЛ5пч:			
исследуемый образец	<u>240–250</u>	<u>90–100</u>	<u>5,5–7,2</u>
по ГОСТ 2856–79	240	95	6,1
	235	90	5,0
МЛ10:			
исследуемый образец	<u>235–245</u>	<u>140–155</u>	<u>3,0–3,6</u>
по ГОСТ 2856–79	235	145	3,2
	230	140	3,0

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – средние значения.

Для опробования технологии, позволяющей устранить литейные дефекты методом ХГН, отобраны отливки с характерными дефектами, такими как газовые раковины и поры.

Для устранения дефектов выбраны два порошка марок А-80 и А-20. По трем различным режимам с использованием установки ДИМЕТ-405 выполнено напыление на отобранные отливки с литейными дефектами. На рис. 3 представлена отливка с характерным дефектом до и после напыления.

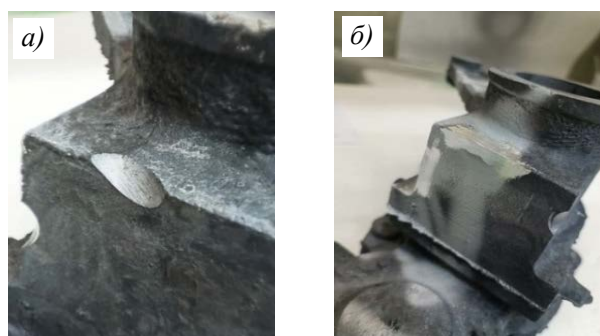


Рис. 3. Отливка «Корпус» до (а) и после напыления (б)

Для исследований структуры, механических свойств, коррозионной стойкости и адгезии из отливок с устраненными дефектами вырезаны заготовки.

Исследованы механические свойства образцов из магниевых сплавов МЛ15пч и МЛ10 с дефектами до и после напыления (табл. 2). В процессе напыления варьировали расход порошка 15, 25 и 40 г/мин в соответствии с режимами установки 3, 4 и 5. Температура воздушного потока составила 75 и 100 °С.

Таблица 2

Механические свойства (минимальные значения) образцов из сплавов МЛ15пч и МЛ10

Сплав	Образец	Порошко- вый материал	Расход порошка, г/мин	Температу- ра воздуш- ного пото- ка, °С	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	σ _в ^{нап} / σ _в ^{осн}	
МЛ15пч	С дефектом	А-80	15	75	65	55	1,8	0,30	
				100	90	50	0,8	0,46	
			25	75	190	80	5,2	0,97	
				100	195	90	5,5	1,00	
			40	75	180	95	3,8	0,92	
				100	195	95	5,2	1,00	
		А-20	15	75	75	60	2,0	0,38	
				100	90	50	0,7	0,46	
			25	75	185	80	5,2	0,94	
				100	195	95	5,2	1,00	
			40	75	190	95	3,8	0,97	
				100	195	90	5,2	1,00	
	Без дефекта					195	95	5,3	–
	По ОСТ 1 90248–77	–				≥135	≥78	≥0,5	
МЛ10	С дефектом	А-80	15	75	160	125	0,5	0,68	
				100	165	120	0,4	0,70	
			25	75	200	150	1,7	0,85	
				100	210	155	1,6	0,89	
			40	75	220	165	1,6	0,93	
				100	225	160	1,7	0,95	
		А-20	15	75	155	120	0,4	0,65	
				100	165	120	0,6	0,70	
			25	75	210	135	1,6	0,89	
				100	200	170	1,8	0,85	
			40	75	220	165	1,6	0,93	
				100	235	170	1,7	1,00	
	Без дефекта					235	170	1,6	–
	По ОСТ 1 90248–77	–				≥175	≥98	≥1,5	
Примечание. σ _в ^{нап} / σ _в ^{осн} – соотношение предела прочности образцов после и до напыления.									

По результатам анализа полученных данных установлено, что использование порошков А-80 и А-20 возможно при скорости подачи не менее 25 г/мин. При расходе 15 г/мин не обеспечивается плотное прилегание порошка в местах дефектов и происходит отслаивание. Большинство образцов разрушаются в местах дефектов. На рис. 4 представлены образцы с разрушением вне напыляемого слоя и в местах напыления с низкой скоростью подачи порошка.

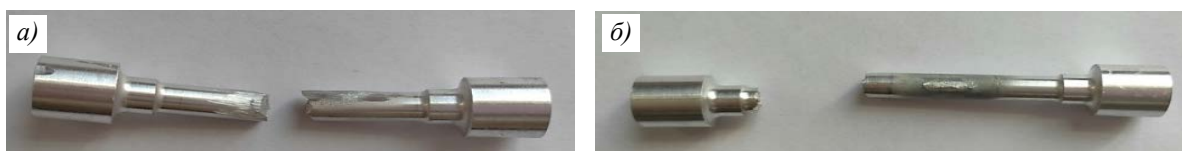


Рис. 4. Разрыв образцов из магниевого сплава МЛ10 в зоне напыления (а) и вне зоны напыления (б)

Анализ микроструктуры показал, что на образцах из сплавов МЛ5пч и МЛ10 с напылением порошка со скоростью 25 и 40 г/мин на границе «порошок–основной металл» порошок плотно прилегает к основному металлу, местами диффундируя в верхний слой основного материала (рис. 5). При скорости напыления 15 г/мин порошок располагается исключительно на поверхности, не образуя прочного контакта, и отслаивается. При механических испытаниях образцы с порошками, напыленными со скоростью 15 г/мин, разрушились в местах напыления либо порошок отслаивался.

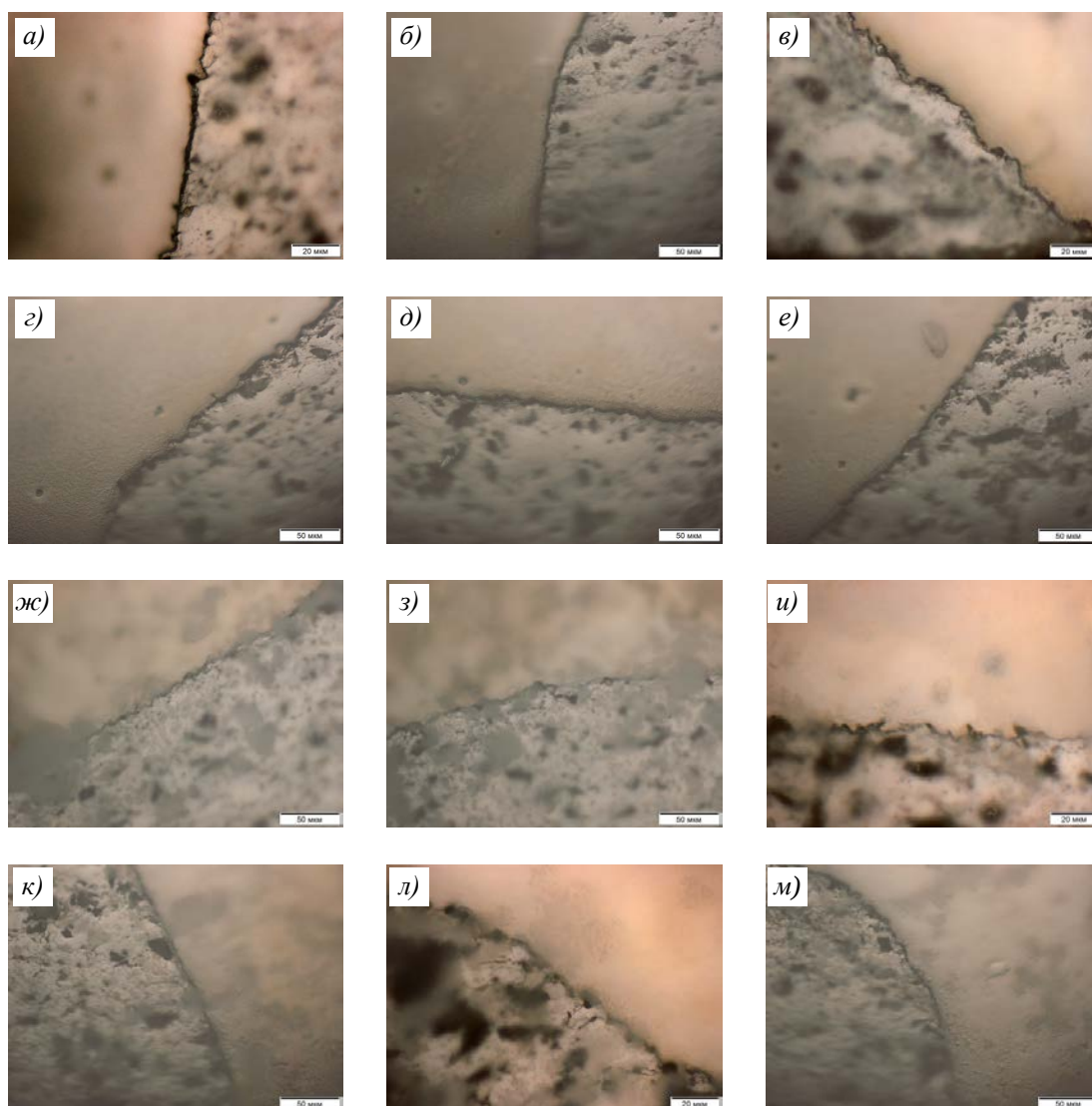


Рис. 5. Микроструктуры образцов из сплавов МЛ5пч (а–е) и МЛ10 (ж–м) с порошками марки А-20 (а–в, ж–и) и А-80 (з–е, к–м), нанесенными по режиму 3 (а, з, ж, к), 4 (б, д, з, л) и 5 (в, е, и, м)

Ввиду недостаточной скорости напыления 15 г/мин для определения адгезии выбраны образцы с порошками, нанесенными со скоростью напыления 25 и 45 г/мин.

На образцы из магниевых сплавов МЛ15пч и МЛ10 с устраненными дефектами наносили лакокрасочное покрытие (один слой грунтовки ЭП-076 и два слоя эмали ЭП-140). Адгезию покрытий определяли на 26 образцах с порошками А-20 и А-80. По результатам испытаний всех образцов адгезия составила 1 балл (рис. 6).



Рис. 6. Образцы из магниевых сплавов после испытаний на адгезию

Полученные результаты исследований позволили выбрать технологические параметры устранения литейных дефектов на отливках и образцах из магниевых сплавов на установке ДИМЕТ-405.

Фильтрация и сила тока индуктора

В качестве фильтров в серийном производстве для сплава системы Mg–PЗМ–Zr используют пенокерамические фильтры и стальные сетки. Для фильтрации магниевого сплава ВМЛ26 выбрана сетка из стали марки Ст.3 с диаметром отверстий 0,5–1 мм.

Для обеспечения требуемого содержания легирующих элементов, особенно трудно вводимых и плохо усвояемых, таких как цирконий и иттрий, равномерно распределенных во всем объеме, необходимо стабильное перемешивание расплава (индукционное перемешивание). Кроме того, следует избегать резкого снижения температуры жидкого металла при выплавке сплавов.

При выплавке в расплаве формируются две области рециркуляции вихревых токов. Процессом перемешивания можно управлять, изменяя частоту или силу тока индуктора. При высоком уровне тока происходит более интенсивное перемешивание, и металл становится однороднее. Однако при постоянном высоком токе стенки тигля изнашиваются быстрее. При низком значении силы тока продолжительность выплавки увеличивается в 2–3 раза. В тигле практически не происходит перемешивания ввиду слабого действия тока, что приводит к неоднородности химического состава в сплаве.

Для выплавки магниевого сплава ВМЛ26 на индукционной плавильной установке выбраны три режима нагрева при силе тока индуктора 50, 100 и 150 А. Указанные режимы нагрева выбраны с целью обеспечения стабильной работы индукционной печи, предотвращения перегрева металла и износа тигля при максимальном режиме работы индукционной плавильной установки.

Исследовано влияние силы тока индуктора на однородность химического состава и механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) сплава ВМЛ26 системы Mg–PЗМ–Zr. При выплавке по режиму с силой тока индуктора 50 А установлено несоответствие химического состава по цинку, цирконию, гадолинию и церию, при 100 А – недостаточное содержание циркония. Осаждение редкоземельных металлов (PЗМ) и циркония можно объяснить недостаточным влиянием индукционных токов на перемешивание расплава.

При выплавке сплава ВМЛ26 системы Mg–PЗМ–Zr при силе тока индуктора 50 А увеличивается продолжительность расплавления металла, что приводит к выгоранию легкоплавкого цинка, а также не обеспечивает растворения легирующих элементов.

Исследованы механические свойства отдельно отлитых образцов из магниевого сплава ВМЛ26, полученных по различным режимам нагрева с использованием в качестве фильтров стальной сетки и пенокерамического фильтра (табл. 3). Установлено, что режим при силе тока 150 А обеспечивает уровень механических свойств сплава ВМЛ26, соответствующий требованиям ТУ 1-595-24-1942–2021.

Таблица 3

Механические свойства отдельно отлитых образцов из сплава ВМЛ26

Свойства	Значения свойств образцов				по ТУ 1-595-24-1942–2021
	при силе тока индуктора, А				
	50	100	150		
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\frac{260-270}{260}$	$\frac{295-305}{300}$	$\frac{300-310}{305}$	≥ 300	
$\sigma_{0,2}$, МПа	$\frac{170-185}{200}$	$\frac{195-200}{200}$	$\frac{190-220}{210}$	≥ 120	
δ , %	$\frac{2,9-5,7}{4,2}$	$\frac{2,6-5,9}{3,5}$	$\frac{2,5-6,4}{3,9}$	$\geq 2,0$	
Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – средние значения.					

Исследована микроструктура образцов из магниевого сплава ВМЛ26 (рис. 7–12), выплавленных при различной силе тока индуктора с использованием в качестве фильтра стальной сетки.

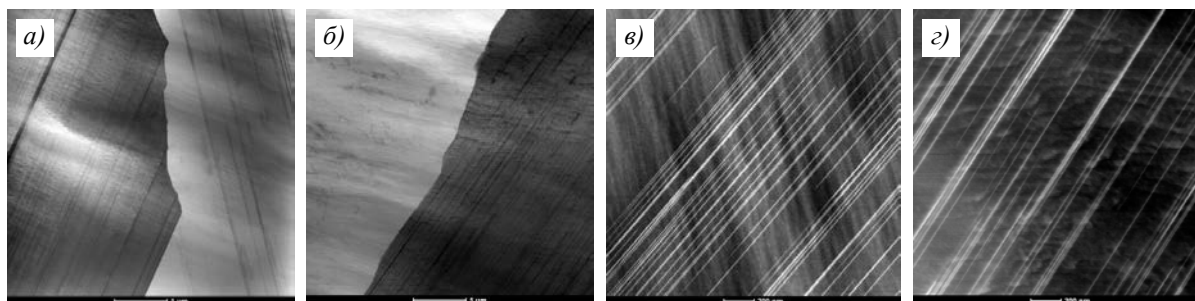


Рис. 7. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ26 (светлопольные изображения), выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б, з)

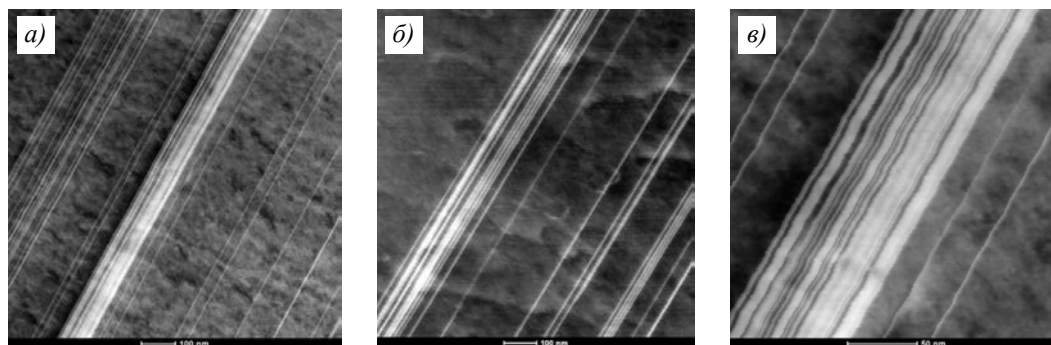


Рис. 8. Примеры LPSO-фаз в объеме зерен α -Mg (HAADF-изображения) в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б)

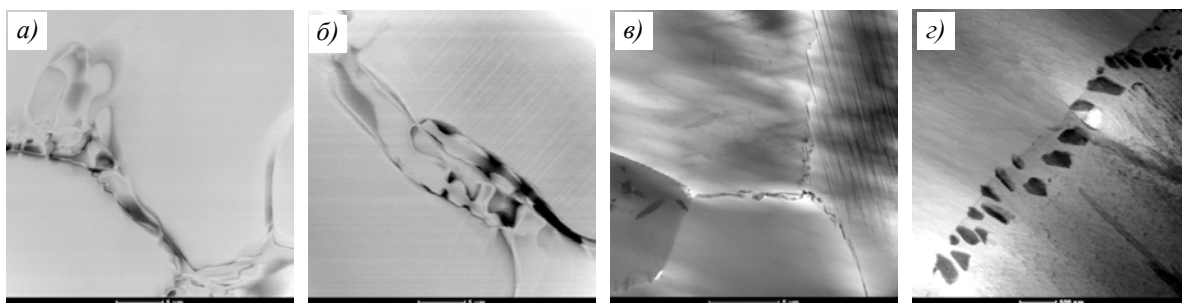


Рис. 9. Эвтектика и интерметаллидные включения по границам зерен в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б, з)

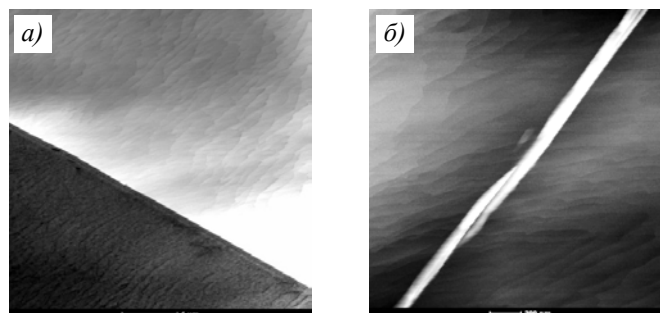


Рис. 10. Микроструктуры образца из сплава ВМЛ26, выплавленного при силе тока 100 А: а – два зерна α -Mg; б – зернограничные выделения интерметаллидной фазы

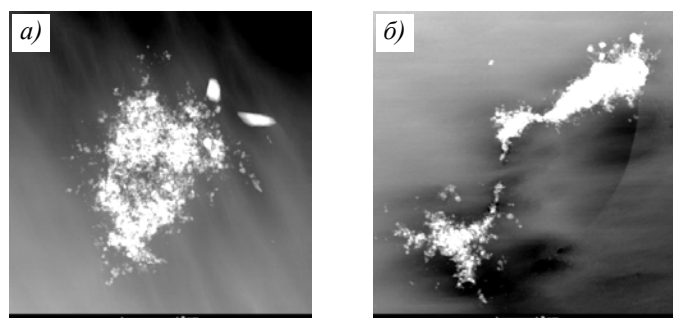


Рис. 11. Скопления цирконидов иттрия в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а) и 100 А (б)

Структура материала образцов представлена зернами твердого раствора α -Mg, в объеме которых равномерно распределены пластины γ' -фазы, содержащие РЗМ. Небольшая доля пластин γ' -фазы образует LPSO-фазы (long-period stacking order phases) шириной до 100 нм. Вдоль части межзеренных границ расположены частицы интерметаллидной β_1 -фазы, содержащей РЗМ, а также области эвтектики, состоящей из твердого раствора магния и интерметаллидной фазы магния с Gd, Nd, Y и Zn.

Скопления гидридов иттрия YH_2 с мелкодисперсными частицами, содержащими цирконий (предположительно, гидриды циркония), обнаружены в объеме образцов, выплавленных при силе тока 50 и 100 А (рис. 12), но не выявлены в образце, полученном при силе тока 150 А.

На основании полученных результатов исследования установлено, что наличие в сплаве гидридов иттрия и циркония (рис. 11 и 12) при использовании силы тока индуктора 50 и 100 А – результат недостаточного перемешивания и выведения этих соединений

на поверхность расплава. Более интенсивное перемешивание при силе тока индуктора 150 А обеспечило выведение гидридов из расплава на поверхность и их последующее удаление.

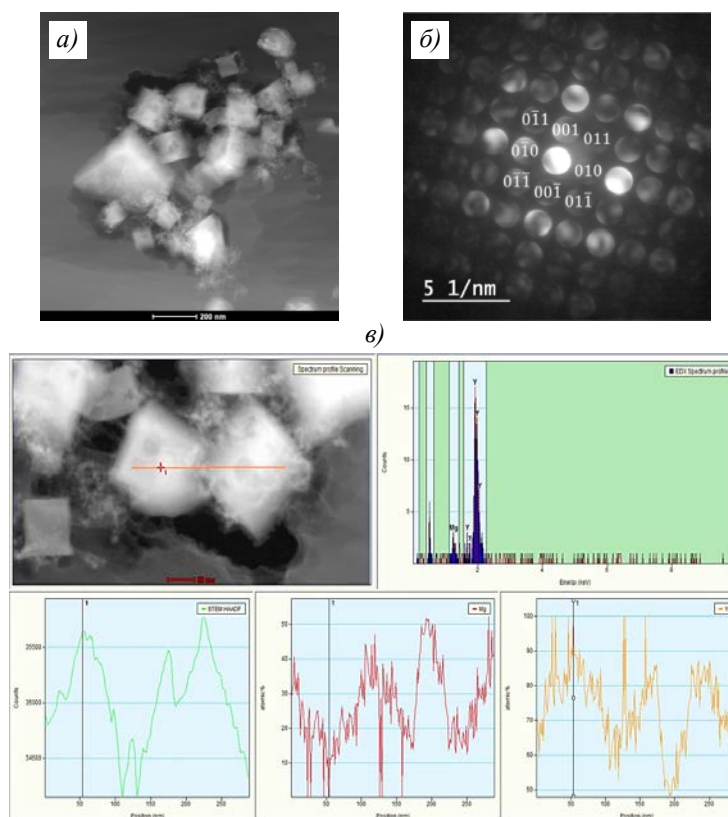


Рис. 12. Результаты дифракционного и элементного анализа гидридов иттрия YH_2 : *а* – темнопольное изображение; *б* – дифракция в сходящемся пучке, проиндексированная в рефлексах YH_2 , ось зоны $[100]$; *в* – результаты энергодисперсионной спектроскопии по линии. Присутствие магния – следствие перекрытия с матрицей

Исследована коррозионная стойкость образцов из магниевого сплава ВМЛ26, выплавленных по различным режимам нагрева (табл. 4). Показано повышение коррозионной стойкости по количеству выделившегося водорода при увеличении силы тока индуктора.

Таблица 4

Коррозионная стойкость сплава ВМЛ26 при выплавке на плавильной установке с различной силой тока индуктора

Сила тока индуктора, А	Коррозионная стойкость в 3%-ном растворе NaCl по выделению водорода за 48 ч, $\text{см}^3/\text{см}^2$ (средние значения)
50	1,55
100	1,20
150	0,80

Коррозионная стойкость сплава, выплавленного при силе тока индуктора 150 А, удовлетворяет данным паспорта № 2042 на пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав марки ВМЛ26.

Заключения

По результатам исследований микроструктуры, механических свойств, адгезии и опробования разработанной технологии выбраны технологические режимы нанесения порошков на отливки из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 методом ХГН для устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров.

Исследования микроструктуры, механических свойств, коррозионной стойкости магниевых сплавов ВМЛ26 и полученные положительные результаты позволили выбрать режим выплавки на индукционной плавильной установке. Использование режима выплавки при силе тока индуктора 150 А обеспечивает необходимый уровень свойств сплава ВМЛ26 и предотвращает попадание в отливки гидридов иттрия и циркония, которые негативно влияют на механические свойства и коррозионную стойкость.

Список источников

1. 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). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплавов МЛ9 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. 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). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Амелин А.С. Критериальная оценка усадочной пористости в отливках из магниевых сплавов // Тез. док. XLIII Междунар. молодеж. науч. конф. «Гагаринские чтения 2017». М.: МАИ, 2017. С. 435.
6. Трапезников А.В., Власова К.А., Решетников Ю.В. Применение таблетированных модификаторов для литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
7. Zhang Y., Rong W., Wu Y. et al. A detailed HAADF-STEM study of precipitate evolution in Mg–Gd alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 777. P. 531–543. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.193.
8. Пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав: пат. 2753660 Рос. Федерация; заявл. 02.11.20; опубл. 20.08.02.
9. Яровая Е.И., Леушин И.О., Спасская М.М., Ларин М.А. Эффективность управления литейными технологическими процессами // Черные металлы. 2018. № 3. С. 29–33.
10. Коробков К.С., Полянский И.П. Влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства отливок из магниевых сплавов МЛ5пч // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 4 (43). С. 397–398.
11. Трофимов Н.В., Леонов А.А. Исследование влияния легирующих элементов (Nb и Ti) на содержание примесей и механические свойства высокопрочного магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr // Металлы. 2020. № 3. С. 14–18.
12. Фомина М.А., Захаров К.Е., Ямщиков Е.И., Трофимов Н.В. Подбор и исследование оптимальной рецептуры состава для локального удаления продуктов коррозии с магниевых сплавов, а также технологии его применения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.

13. 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 and Alloys*. 2022. Vol. 11. No. 3. P. 2326–2339. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
14. Мухина И.Ю. Основы технологии плавки магниевых сплавов в защитных средах // *Литейное производство*. 2021. № 1. С. 2–8.
15. Шаломеев В.А. Модифицирование магниевого сплава Мл-5 при фильтрации через углерод-содержащие материалы // *Конструкционные материалы*. 2008. № 2. С. 198–201.
16. Моисеев К.В., Смыков А.Ф., Бережной Д.В. Автоматизированное проектирование системы питания крупногабаритных корпусных отливок из легких сплавов // *Технология легких сплавов*. 2011. № 1. С. 69–72.
17. Бобрышев Б.Л., Моисеев В.С., Александрова Ю.П. Совершенствование комплексной обработки магниевых сплавов при плавке // *Технологии легких сплавов*. 2021. № 3. С. 35–44.

References

1. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, p. 331–334.
3. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Amelin A.S. Criterial assessment of shrinkage porosity in magnesium alloy castings. *Reports XLIII Int. Youth Scientific Conf. «Gagarin Readings-2017»*. Moscow: MAI, 2017, p. 435.
6. Trapeznikov A.V., Vlasova K.A., Reshetnikov Yu.V. Tableted modifiers for cast aluminum alloys. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 22, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
7. Zhang Y., Rong W., Wu Y. et al. A detailed HAADF-STEM study of precipitate evolution in Mg–Gd alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 777, pp. 531–543. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.193.
8. *Fireproof high-strength casting magnesium alloy*: pat. 2753660 Rus. Federation; appl. 02.11.20; publ. 20.08.02.
9. Yarovaya E.I., Leushin I.O., Spasskaya M.M., Larin M.A. Efficiency of foundry process control. *Chernye metally*, 2018, no. 3, pp. 29–33.
10. Korobkov K.S., Polyansky I.P. Influence of heat treatment modes on the structure and mechanical properties of magnesium alloy ML5pch castings. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2022, no. 4 (43), pp. 397–398.
11. Trofimov N.V., Leonov A.A. Study of the influence of alloying elements (Nb and Ti) on the impurity content and mechanical properties of high-strength magnesium alloy of the Mg–Zn–Zr system. *Metally*. 2020, no. 3, pp. 14–18.
12. Fomina M.A., Zakharov K.E., Yamshchikov E.I., Trofimov N.V. Selection and research of optimal paste formulation for local removal of corrosion products from magnesium alloys as well as the technology of it's application. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.

13. 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 and Alloys*, 2022, vol. 11, no. 3, pp. 2326–2339. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
14. Mukhina I.Yu. Fundamentals of the technology of smelting magnesium alloys in protective environments. *Liteynoe proizvodstvo*, 2021, no. 1, pp. 2–8.
15. Shalomeev V.A. Modification of magnesium alloy MI-5 during filtration through carbon-containing materials. *Konstruktsionnye materialy*, 2008, no. 2, pp. 198–201.
16. Moiseev K.V., Smykov A.F., Berezhnoy D.V. Automated design of a feed system for large-sized case castings made of light alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2011, no. 1, pp. 69–72.
17. Bobryshev B.L., Moiseev V.S., Aleksandrova Yu.P. Improving the complex processing of magnesium alloys during melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, no. 3, pp. 35–44.

Информация об авторах

Трофимов Николай Вадимович, начальник сектора, 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

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

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

Information about the authors

Nikolay V. Trofimov, Head of Sector, 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

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

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

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.11.2024.
The article was submitted 07.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.11.2024.