
Научная статья

УДК 669.721.5:621.762.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-45-60

МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ КАК ОСНОВА МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Е.Ф. Волкова¹, М.В. Акинина¹, И.В. Мостяев¹, А.А. Алиханян¹, А.А. Леонов¹

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

Аннотация. Изложены и обсуждены результаты определения механических, коррозионных свойств и исследования особенностей микроструктуры металломатричных композиционных материалов (МКМ) на основе различных систем легирования магниевого сплава: Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Zn–Ca, Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd) и Mg–Al–Ca. В качестве наполнителя использованы наноразмерные армирующие частицы SiC, Y₂O₃ и Al₂O₃. Проведены исследования МКМ в литом и гомогенизированном состояниях. Установлено, что оптимальным составом МКМ следует считать сплав на основе системы Mg–Zn–Ca/SiC (3 % (по массе)).

Ключевые слова: металломатричные композиционные материалы, магниевого сплава композиционных материалов, упрочняющие наноразмерные частицы, механические и коррозионные свойства композиционных материалов, микроструктура металломатричных композиционных материалов

Для цитирования: Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Алиханян А.А., Леонов А.А. Магниевого сплава как основа металломатричных композиционных материалов: исследование структуры и свойств // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-45-60.

Scientific article

MAGNESIUM ALLOYS AS THE BASIS OF METAL MATRIX COMPOSITE MATERIALS: A STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES

E.F. Volkova¹, M.V. Akinina¹, I.V. Mostyaev¹, A.A. Alihanyan¹, A.A. Leonov¹

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 and describes the results of determining mechanical and corrosion properties, as well as microstructure particularities of metal matrix composite materials (MMC) based on various alloying systems of magnesium alloys: Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Zn–Ca, Mg–Zn–Zr–REE (Y, Nd), Mg–Al–Ca. Nanoscale reinforcing particles SiC, Y₂O₃, Al₂O₃ were used as a filler. The studies of MMC were carried out in cast and homogenized states. It has been established that Mg–Zn–Ca alloy system/3 wt % SiC should be considered as the optimal composition for the metal matrix composite material.

Keywords: metal matrix composite materials, magnesium base of composite materials, reinforcing nanoparticles, mechanical and corrosion properties of composite materials, microstructure of metal matrix composite materials

For citation: Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Alihanyan A.A., Leonov A.A. Magnesium alloys as the basis of metal matrix composite materials: a study of structure and properties. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-45-60.

Введение

Получение композиционных материалов в XXI в. следует рассматривать в качестве интенсивно развивающегося стратегического направления в области материалов и технологий их переработки [1, 2].

Перспективными представляются исследования в части разработки конструкционных металломатричных композиционных материалов (МКМ) с использованием магниевых сплавов в качестве основы (матрицы). Матрица позволяет сохранять заданную форму и монолитность изделия и в то же время обеспечивает распределение нагрузки по всему объему МКМ, способствует устойчивости упрочняющих элементов к воздействию внешних факторов.

Выбор магниевых сплавов обусловлен тем, что они являются наиболее легкими металлическими конструкционными материалами с большей весовой эффективностью (до 20–25 %) по сравнению с широко применяемыми алюминиевыми сплавами аналогичного назначения. Кроме того, сплавы на основе магния отличаются хорошими технологическими свойствами (высокая способность к обрабатываемости резанием, необходимые деформационные характеристики при соблюдении оптимальных обработанных параметров пластической деформации и др.), высокой демпфирующей способностью. Применение магниевых сплавов отвечает требованиям энергосбережения, обеспечивает снижение выбросов вредных веществ в транспортном секторе (в частности, в автомобилестроении) и других областях современной техники.

Использование магниевых сплавов в качестве матрицы МКМ приводит к уменьшению эксплуатационных расходов на 5–10 % (в частности, снижает потребление топлива), позволяет повысить массу полезной нагрузки за счет снижения массы соответствующих деталей и узлов в изделиях транспортной, авиационной, космической отраслей промышленности [3–7].

Однако существуют определенные проблемы при использовании магниевых сплавов. Например, следует учитывать недостаточную технологическую пластичность при проведении операции деформации высоколегированных и высокопрочных магниевых сплавов, а также тот факт, что большинство магниевых сплавов характеризуется невысокой коррозионной стойкостью.

Под технологической пластичностью подразумевается способность материала к деформированию в конкретных условиях напряженного состояния, при определенных температуре и скорости деформации. Причем комплекс свойств, определяемых путем стандартных механических или специальных технологий, включает такую характеристику, как относительное удлинение [8].

Снижение проявления указанных отрицательных факторов достигается в первую очередь подбором соответствующих легирующих элементов для матричных магниевых сплавов, а также армирующих компонентов и технологических параметров получения МКМ [4, 5, 8–14].

В данной работе проведены сравнительные исследования структуры и свойств МКМ на магниевой основе с целью выбора наиболее перспективного состава для проведения последующей пластической деформации и изготовления деформированного полуфабриката. В связи с этим при выборе состава МКМ особое внимание обращали на величины относительного удлинения и коррозионной стойкости.

При разработке МКМ важное значение также приобретает выбор упрочняющих элементов, т. е. наполнителя.

Анализ научно-технических публикаций дает основание полагать, что наиболее целесообразным при разработке МКМ на основе магния является применение в качестве наполнителя наноразмерных армирующих частиц, таких как SiC, Y₂O₃ и Al₂O₃ [15–34].

В работах ряда авторов установлено, что использование указанных наноразмерных армирующих частиц способствует измельчению зерна магниевой матрицы, вызывает дисперсионное упрочнение и, как следствие, повышает уровень механических свойств МКМ. При определенном сочетании и содержании эти армирующие элементы могут привести к дополнительному повышению прочности МКМ по сравнению с прочностью матрицы, что изначально можно было достичь при легировании соответствующими элементами [11, 14–17].

Таким образом, на начальном этапе разработки МКМ выбор материала матрицы и армирующих элементов, анализ результатов изучения структуры, уровня основных механических и коррозионных свойств матричного материала приобретают особую значимость и актуальность [4, 5, 15–37].

Цель работы – исследование структуры и свойств магниевых сплавов, предназначенных для применения в качестве основы нового перспективного МКМ, а также выбор упрочняющих армирующих наноразмерных частиц.

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») [2].

Материалы и методы

На основании анализа научно-технической литературы и результатов предварительных собственных экспериментов в качестве материалов для исследования выбраны составы матричных сплавов. Основой сплавов служили системы легирования Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Zn–Ca, Mg–Al–Ca и Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd) (табл. 1).

Таблица 1

Составы экспериментальных металломатричных композиционных материалов (МКМ) на магниевой основе, содержащие армирующие частицы

Условный номер состава МКМ	Система легирования	Армирующие частицы	Содержание армирующих частиц, % (по массе)
1	Mg–Al–Zn–Mn	SiC	2
2	Mg–Al–Zn–Mn	SiC	4
3	Mg–Al–Zn–Mn	Y ₂ O ₃	3
4	Mg–Al–Zn–Mn	Y ₂ O ₃	5
5	Mg–Zn–Ca	SiC	3
6	Mg–Al–Ca	SiC	2
7	Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd)	SiC	1
8	Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd)	SiC	2
9	Mg–Al–Zn–Mn	Al ₂ O ₃	2
10	Mg–Al–Zn–Mn	Al ₂ O ₃	4

Армирующие элементы вводили в МКМ с целью усовершенствования эксплуатационных свойств. При этом учитывали, что армирующие элементы должны обладать более высокими значениями прочности, твердости, модуля упругости, чем материал матрицы.

В данной работе армирующие элементы (Y₂O₃, Al₂O₃ и SiC) в виде наноразмерных частиц также выбраны исходя из анализа данных научно-технической литературы и результатов предварительных экспериментов [15–37].

Слитки выплавлены в индукционной установке в защитной атмосфере и отлиты в металлические изложницы $\varnothing 55 \times 145$ мм.

Режимы термической обработки (гомогенизации) магниевых сплавов, использованных в качестве основы МКМ, установлены в соответствии с особенностями сплавов каждой системы легирующих элементов [8–10, 12–14] и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температура гомогенизационного отжига с заданной продолжительностью выдержки слитков из металломатричных композиционных материалов (МКМ) с армирующими частицами

Условный номер состава МКМ	Температура гомогенизации, °С
1	1-я ступень: 350–390 2-я ступень: 400–440
2	
3	
4	
5	
6	
7	320–360
8	380–420
9	1-я ступень: 400–440 2-я ступень: 450–480
10	

Микроструктуру слитков исследовали на растровом электронном микроскопе с установкой для микрорентгеноспектрального анализа. Фотографии выполняли в режиме композиционного контраста, который определяется средним атомным номером области (фазы).

Локальный элементный состав интерметаллидных фаз и основного твердого раствора на основе магния определяли в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015.

Определение механических характеристик при испытании на одноосное растяжение проведено в соответствии с ГОСТ 1497–2023.

Коррозионные испытания образцов из слитков выполнены по ГОСТ 9.913–90 при полном погружении в 3%-ный раствор NaCl. Продолжительность испытаний составила 48 ч. Скорость коррозии установлена по потере массы и количеству выделившегося водорода.

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

Результаты и обсуждение

Для испытания основных механических и коррозионных свойств экспериментальных составов МКМ из полученных слитков изготовлены стандартные образцы.

Результаты определения механических характеристик при испытании на одноосное растяжение экспериментальных составов МКМ, содержащих различные армирующие компоненты, в литом состоянии приведены в табл. 3.

Определены механические характеристики слитков из сплавов экспериментальных МКМ после гомогенизации при одноосном растяжении (табл. 4). При этом особое внимание уделено составам МКМ, характеризующимся повышенной пластичностью, поскольку полученные заготовки предназначены для проведения в дальнейшем операции пластической деформации.

Таблица 3

Механические свойства образцов из экспериментальных металломатричных композиционных материалов (МКМ) в литом состоянии при растяжении

Условный номер состава МКМ	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
1	$\frac{140-145}{140}$	120	$\frac{1,5-2,1}{1,8}$
2	$\frac{125-140}{130}$	$\frac{100-120}{110}$	$\frac{1,0-1,8}{1,4}$
3	$\frac{120-125}{125}$	$\frac{95-100}{95}$	$\frac{2,0-5,9}{4,3}$
4	$\frac{110-130}{115}$	$\frac{90-95}{90}$	$\frac{2,1-4,7}{3,1}$
5	$\frac{145-155}{150}$	85	$\frac{5,9-7,2}{6,6}$
6	$\frac{75-90}{85}$	$\frac{75-85}{80}$	$\frac{0,7-1,7}{1,9}$
7	$\frac{145-150}{145}$	$\frac{120-130}{125}$	$\frac{1,1-1,7}{1,5}$
8	$\frac{145-150}{150}$	$\frac{120-130}{125}$	$\frac{1,4-1,7}{1,5}$
9	$\frac{100-110}{105}$	$\frac{70-90}{80}$	$\frac{2,0-3,3}{3,0}$
10	$\frac{70-85}{75}$	$\frac{65-75}{70}$	$\frac{0,4-2,0}{1,2}$

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 4

Механические свойства образцов из экспериментальных металломатричных композиционных материалов (МКМ) после гомогенизационного отжига при одноосном растяжении

Условный номер состава МКМ	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
1	$\frac{170-190}{180}$	$\frac{84-92}{90}$	$\frac{5,1-11,0}{7,4}$
2	$\frac{145-160}{155}$	105	$\frac{1,8-3,4}{2,7}$
3	$\frac{90-130}{110}$	$\frac{85-90}{85}$	$\frac{1,8-6,3}{4,3}$
4	$\frac{90-140}{115}$	$\frac{85-95}{90}$	$\frac{3,7-4,3}{3,9}$
5	$\frac{180-200}{190}$	$\frac{85-90}{90}$	$\frac{8,8-12,3}{10,6}$
6	85	80	$\frac{1,1-2,3}{1,7}$
7	$\frac{135-155}{145}$	125	$\frac{0,5-2,1}{1,5}$
8	$\frac{105-135}{120}$	$\frac{110-125}{115}$	$\frac{0,8-1,8}{1,1}$
9	$\frac{110-125}{115}$	$\frac{90-95}{90}$	$\frac{2,8-4,9}{4,1}$
10	$\frac{60-95}{75}$	$\frac{55-90}{55}$	$\frac{2,0-3,4}{2,7}$

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Анализ данных, представленных в табл. 3 и 4, свидетельствует о том, что наиболее благоприятным сочетанием основных механических характеристик при одноосном растяжении обладает состав 5 в литом состоянии (средние значения): предел прочности $\sigma_b = 150$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 85$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 6,6$ %. Данный состав МКМ в гомогенизированном состоянии имеет следующий уровень механических характеристик (средние значения): предел прочности $\sigma_b = 190$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 90$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 10,6$ %.

Таким образом, экспериментальный состав 5 по уровню механических характеристик является наиболее перспективным для дальнейшей разработки деформированного полуфабриката.

Для остальных матричных составов следует отметить, что легирование армирующими наночастицами карбида кремния сплавов систем Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Al–Ca и Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd) приводит к получению низких значений относительного удлинения. Введение армирующих наночастиц оксида иттрия и оксида алюминия в состав сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn как в литом, так и в гомогенизированном состояниях неэффективно с позиции получения благоприятных механических свойств (табл. 3 и 4).

Следует отметить, что гомогенизация неоднозначно сказывается на уровне механических характеристик рассмотренных составов МКМ. Кроме того, термообработка заметно ухудшает показатель общей коррозионной стойкости практически всех исследованных составов. Так, для составов 1, 3, 4 и 7 скорость коррозии возрастает в несколько раз (табл. 5).

Таблица 5

Общая коррозионная стойкость образцов из экспериментальных металломатричных композиционных материалов (МКМ) в литом состоянии и после гомогенизационного отжига

Условный номер состава МКМ	Средняя скорость коррозии образцов МКМ			
	в литом состоянии		после гомогенизационного отжига	
	г/(м ² ·сут)	см ³ /см ² за 48 ч	г/(м ² ·сут)	см ³ /см ² за 48 ч
1	41,6253	6,99	120,2046	16,97
2	3,8078	0,97	7,0770	1,27
3	1,3259	0,23	5,1978	0,78
4	2,4031	0,40	12,3464	1,65
5	6,8591	0,65	14,6931	2,15
6	595,2863	71,21	741,7716	81,39
7	25,6958	4,00	79,9105	10,17
8	16,1571	2,62	17,1778	2,89
9	6,9363	1,13	7,9908	1,48
10	8,9734	1,17	12,1167	1,90

Наилучшей коррозионной стойкостью обладает состав 3 системы легирования Mg–Al–Zn/Y₂O₃ (3 % (по массе)): средняя скорость коррозии составляет 1,3259 и 5,1978 г/(м²·сут) для образцов в литом и гомогенизированном состояниях соответственно. Однако уровень механических свойств этого состава неудовлетворителен.

Самый низкий уровень коррозионных свойств отмечен для состава 6 системы легирования Mg–Al–Ca/SiC (2 % (по массе)): средняя скорость коррозии составляет 595,2863 и 741,7716 г/(м²·сут) для образцов в литом и гомогенизированном состояниях соответственно.

Показатель общей коррозионной стойкости состава 5 можно считать удовлетворительным: 6,8591 и 14,6931 г/(м²·сут) для образцов в литом и гомогенизированном состояниях соответственно.

Коррозионная стойкость магниевых сплавов в значительной степени зависит от наличия легирующих элементов, примесей и неметаллических включений. Значительное отрицательное влияние на коррозионную стойкость магниевых сплавов оказывают металлические примеси Fe, Ni, Cu, Co [8, 38–40].

Обращает на себя внимание тот факт, что во всех исследованных составах МКМ содержание наиболее вредных в отношении коррозии примесных металлов (Fe, Ni, Cu) для деформируемых магниевых сплавов ниже, чем регламентируемое ГОСТ 14957–76 [8, 38–40].

Следовательно, причиной плохой коррозионной стойкости составов МКМ могут служить другие факторы: легирующие элементы в сплаве – основе МКМ, выбранные армирующие наночастицы, режим гомогенизации и другие технологические факторы.

С целью получения более полного представления о природе изученных материалов и обоснованного выбора перспективной композиции исследованы особенности микроструктуры экспериментальных составов 3, 5 и 6 (рис. 1–5).

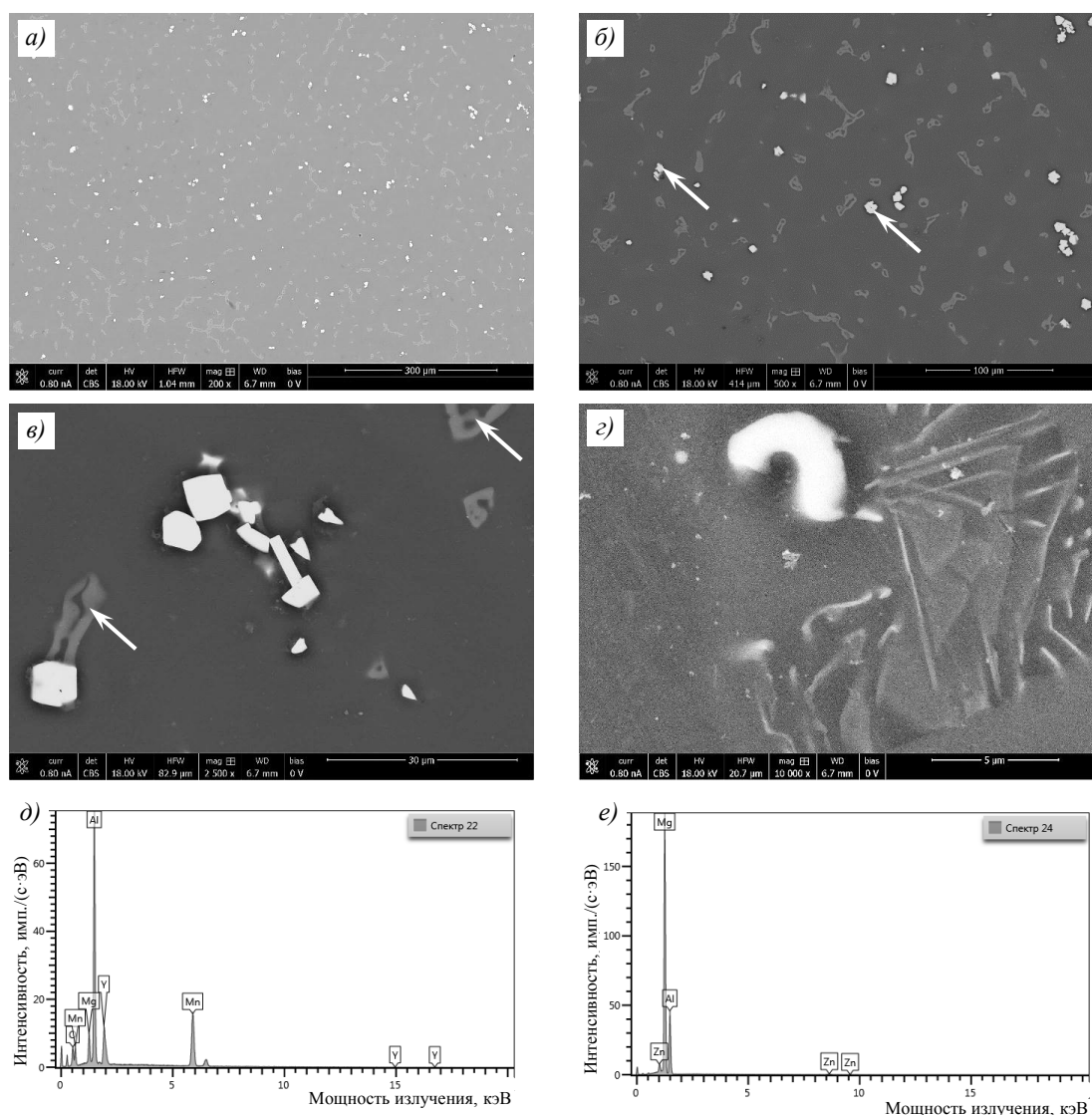


Рис. 1. Микроструктура состава металломатричного композиционного материала 3 в литом состоянии: *a*, *б* – общий вид; *в* – частицы интерметаллидных фаз; *г* – фрагменты эвтектики; *д*, *е* – спектры характеристического рентгеновского излучения для белых частиц (*д*; указаны стрелками на рис. 1, *б*) и фрагментов эвтектики (*е*; указаны стрелками на рис. 1, *в*)

Микроструктуры состава 3 (табл. 1) в литом и гомогенизированном состояниях представляют собой зерна, по границам которых расположены частицы эвтектики (рис. 1 и 2). В объеме зерен и по их границам обнаружены дисперсные частицы интерметаллидных фаз сложного химического состава. Частицы белого цвета (рис. 1, а, б, д) содержат, наряду с магнием, фрагменты фаз на основе алюминия, марганца и иттрия. Гомогенизация не оказывает заметного влияния на морфологию указанных частиц интерметаллидных фаз белого цвета (рис. 1, б, д; рис. 2, а, б). Принимая во внимание данные научно-технической литературы по этому вопросу, следует полагать, что рассмотренные частицы сложных интерметаллидных фаз на основе алюминия, марганца и иттрия являются основными упрочняющими компонентами в исследуемых МКМ [9, 15–17, 22, 23].

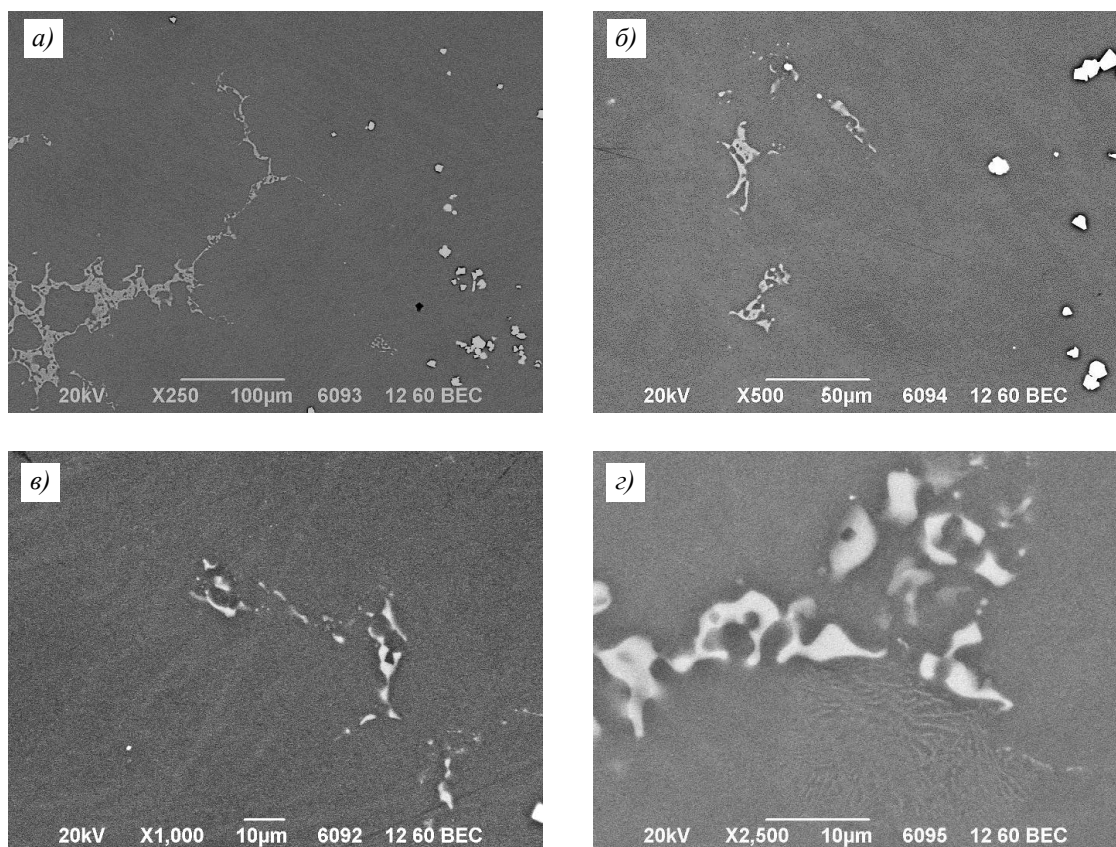


Рис. 2. Микроструктура состава металломатричного композиционного материала 3 в гомогенизированном состоянии: а, б – общий вид; в, з – области фрагмента эвтектики

Гомогенизация способствует частичному растворению фрагментов эвтектики, располагающихся по границам зерен. Это приводит к одновременному обогащению твердого раствора матрицы элементами, образующими фрагменты эвтектики. Границы зерен заметно истончаются (рис. 1, б, з; 2, в, з).

Указанные процессы вызывают определенное ухудшение прочностных свойств состава 3 при значительном снижении коррозионной стойкости (табл. 3–5). Подобное коррозионное поведение характерно для всех исследованных составов МКМ в гомогенизированном состоянии. Наилучшая коррозионная стойкость отмечена для составов 2, 4, 8–10 (табл. 5), однако уровень их механических характеристик крайне низкий как в литом, так и в гомогенизированном состояниях.

Наиболее перспективным, как отмечено ранее, следует считать состав 5. Микроструктуры исследованных образцов этого состава в литом и гомогенизированном состояниях представлены на рис. 3 и 4.

В образцах в литом состоянии хорошо видны равноосные зерна, по границам которых расположены фрагменты эвтектики (рис. 3, *a, б*). Спектры характеристического рентгеновского излучения этих фрагментов (указаны стрелками на рис. 3, *б*) свидетельствуют о наличии в них элементов магния, цинка и в малом количестве – алюминия (рис. 3, *в–д*).

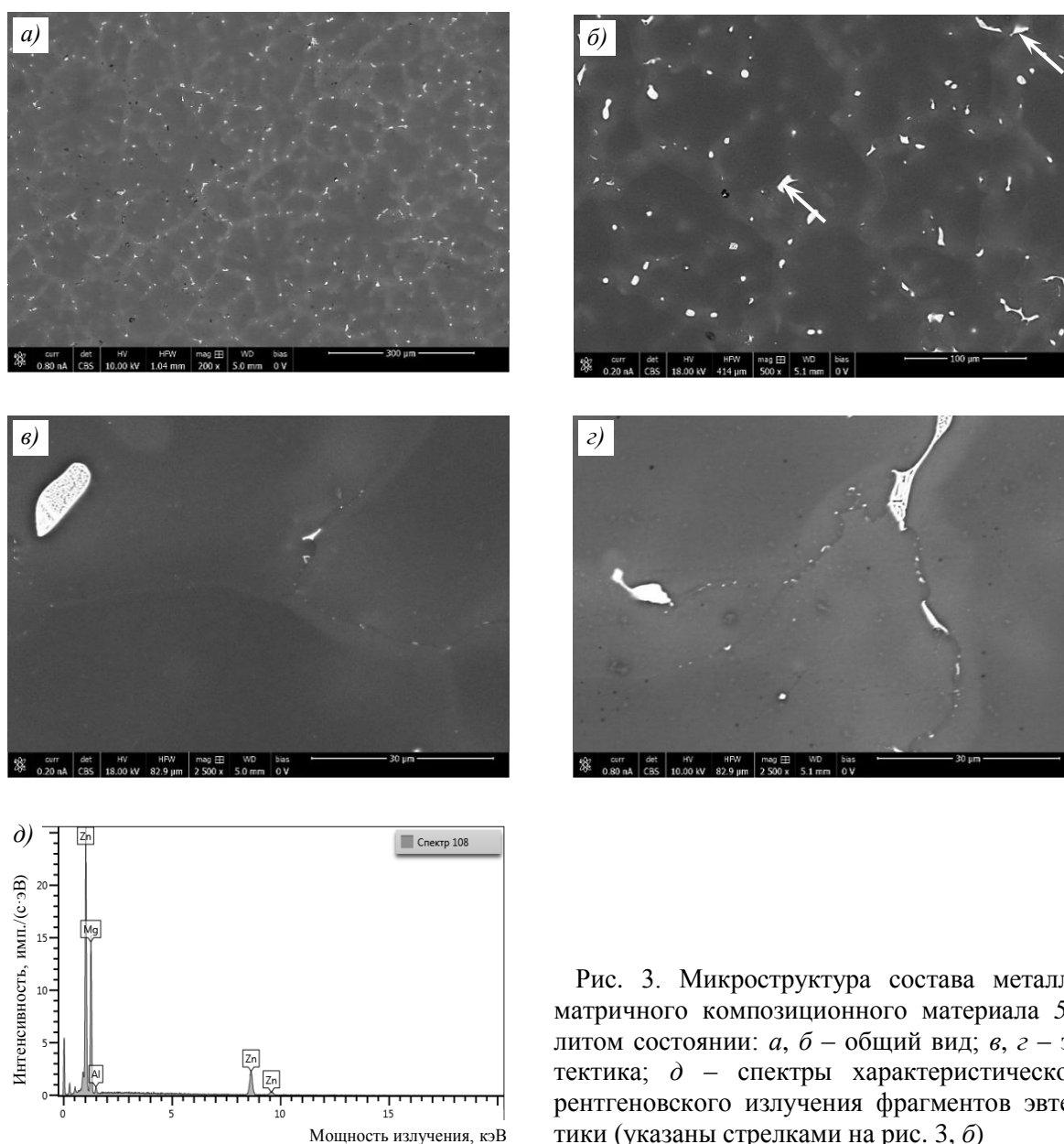


Рис. 3. Микроструктура состава металло-матричного композиционного материала 5 в литом состоянии: *a, б* – общий вид; *в, г* – эвтектика; *д* – спектры характеристического рентгеновского излучения фрагментов эвтектики (указаны стрелками на рис. 3, *б*)

Наряду с заметным растворением фрагментов эвтектики по границам зерен (рис. 4, *a, б*) гомогенизация приводит к формированию тончайших наноразмерных интерметаллидных частиц, образующих своего рода сетку в объеме зерен. Их расположение и сложная конфигурация хорошо видны при увеличении $\times 10000$ (рис. 4, *в–е*).

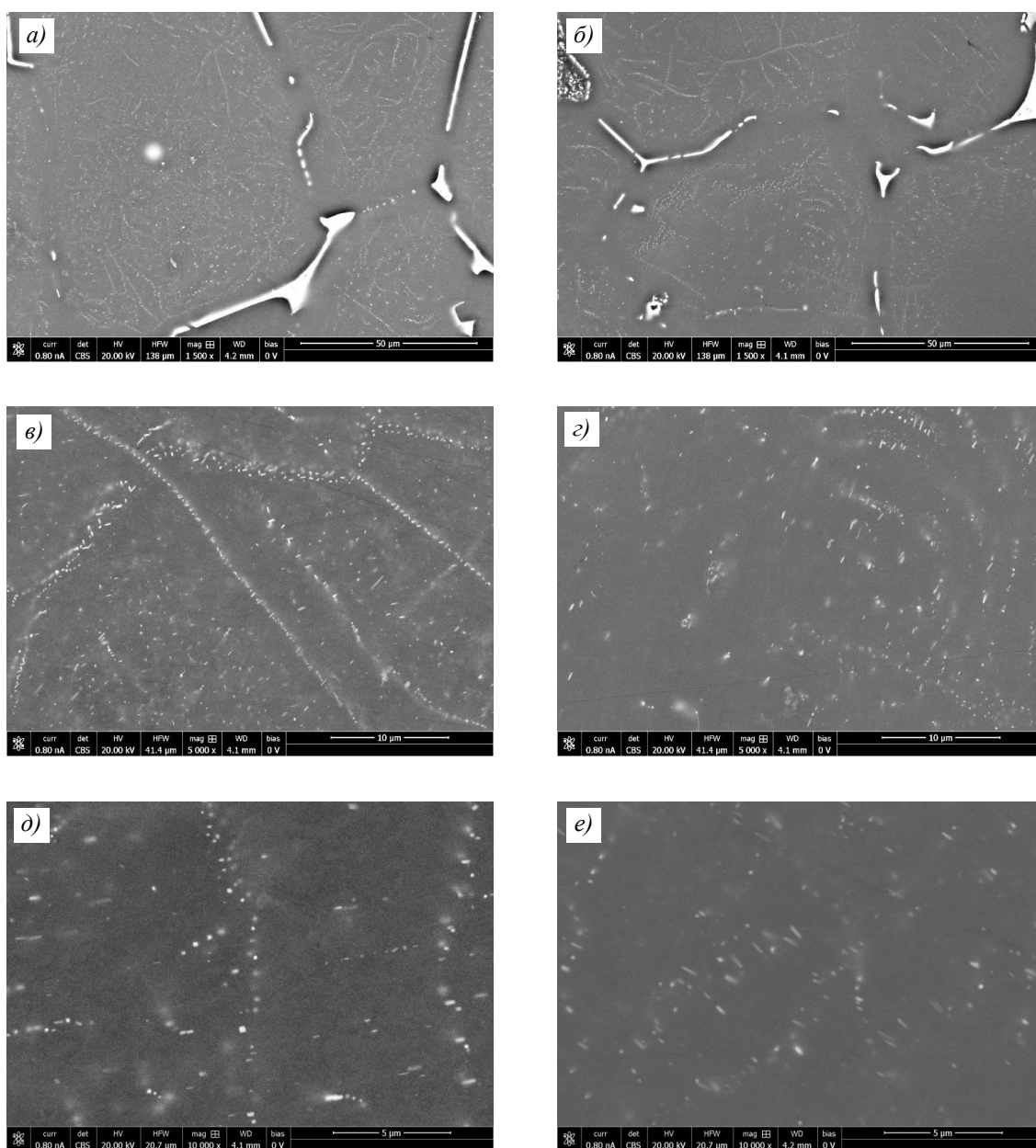


Рис. 4. Микроструктура состава металломатричного композиционного материала 5 в гомогенизированном состоянии: а, б – общий вид, фрагменты эвтектики по границам зерен; в–е – нанодисперсные частицы внутри зерен

Можно предположить, что именно такой характер наноразмерных выделений, наряду с равномерно распределенными наноразмерными частицами карбида кремния в объеме зерна, вызывает заметное повышение уровня механических свойств состава 5 в гомогенизированном состоянии (табл. 4). Одновременно следует учитывать влияние других факторов, в том числе обогащение твердого раствора легирующими элементами за счет частичного растворения фрагментов эвтектики.

Наиболее высокая средняя скорость общей коррозии и низкие значения механических характеристик отмечены для состава б в литом и гомогенизированном состояниях (табл. 3–5). Результаты исследования микроструктуры состава б позволяют в значительной степени объяснить причину низкого уровня свойств этого материала (рис. 5).

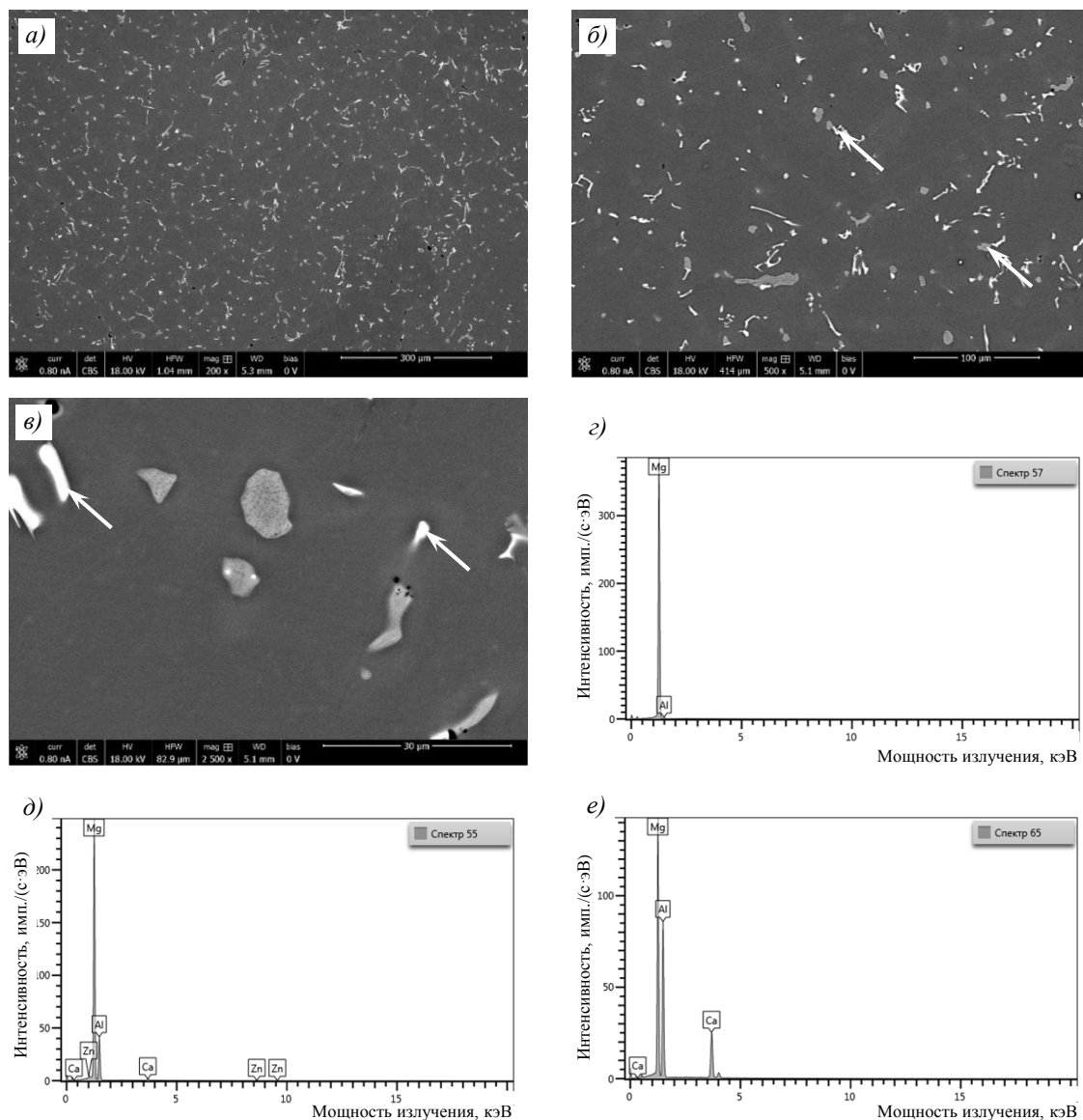


Рис. 5. Микроструктура состава металломатричного композиционного материала б в гомогенизированном состоянии: а, б – общий вид; в – частицы интерметаллидных фаз; г–е – спектры характеристического рентгеновского излучения для матрицы сплава (г), эвтектики (д; указана стрелками на рис. 5, б) и светлых частиц (е; указаны стрелками на рис. 5, в)

Микроструктура состава б системы легирования Mg–Al–Ca/SiC (2 % (по массе)) в исследованных состояниях характеризуется достаточно крупными зернами размером $\sim(50\text{--}70)$ мкм (рис. 5, а, б). В структуре присутствуют частицы фаз на основе магния, алюминия и кальция (по композиционному контрасту) и единичные фрагменты эвтектики. Наличие 2 % (по массе) кальция, характерная игольчатая форма выделений интерметаллидных фаз по границам зерен (рис. 5, а, б), крупные фрагменты эвтектики (рис. 5, в, д, е), некоторые из которых достигают размера $\sim(5\text{--}7)$ мкм (рис. 5, в, е) и содержат алюминий, кальций, – это совокупность причин, оказывающих негативное воздействие на комплекс механических и коррозионных свойств состава б (табл. 3–5).

Заключения

Анализ результатов комплексного изучения микроструктуры и определения механических и коррозионных свойств десяти составов МКМ на основе магниевых сплавов

различных систем легирования (Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Zn–Ca, Mg–Al–Ca и Mg–Zn–Zr–PЗЭ (Y, Nd)) с использованием в качестве наполнителя наноразмерных армирующих частиц (SiC, Y₂O₃, Al₂O₃) в литом и гомогенизированном состояниях позволяет сделать следующие выводы.

Все исследованные экспериментальные составы МКМ содержат минимальное количество вредных примесей, в том числе Fe, Ni и Cu, что ниже уровня, регламентируемого ГОСТ 14957–76.

В результате гомогенизации произошло значительное ухудшение общей коррозионной стойкости всех исследованных составов МКМ при незначительном эффекте повышения механических свойств.

В качестве наиболее перспективного МКМ можно рассмотреть состав системы легирования Mg–Zn–Ca/SiC (3 % (по массе)), для которого в литом и гомогенизированном состояниях характерно сочетание хорошего уровня механических свойств, в том числе высокие значения пластических свойств: $\delta_5 = 8,8–12,3$ % (в гомогенизированном состоянии).

Выбранный состав МКМ характеризуется удовлетворительной общей коррозионной стойкостью: средняя скорость коррозии составила 6,8591 и 14,6931 г/(м²·сут) в литом и гомогенизированном состояниях соответственно.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. 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.
3. Сазонов М.А., Чернышова Т.А., Рохлин Л.Л. Композиционные материалы на магниевой основе, армированной частицами: изготовление и свойства (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 2. С. 3–22.
4. Dey A., Pandey K.M. Magnesium metal matrix composites a review // Reviews on Advanced Materials Science. 2015. Vol. 42. Is. 1. P. 58–67.
5. Annamalai S., Periyakoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications // Materials and Technologies. 2019. Vol. 53. Is. 6. P. 881–890.
6. Ali Y., Qiu D., Jiang B. et al. Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: a review article // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 619. P. 639–651.
7. Song J.F., She J., Chen D.L., Pan F.S. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide // Journal of Magnesium and Alloys. 2020. Vol. 8. P. 1–41.
8. Магниевые сплавы: справочник в 2 т./ под ред. М.Б. Альтмана, А.Ф. Белова, В.И. Добаткина и др. М.: Металлургия, 1978. Т. 1: Металловедение магния и его сплавов. Области применения. 231 с.
9. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Леонов А.А., Алиханян А.А. Характерные особенности термической обработки композиционных материалов на основе магния и магниевых сплавов. Обзор // Технология легких сплавов. 2024. № 3. С. 15–24.
10. Мостяев И.В., Акинина М.В. Особенности и тенденции развития в области термической обработки магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-41-48.
11. Huang S.-J., Ali A.N. Effects of heat treatment on the microstructure and microplastic deformation behavior of SiC particles reinforced AZ61 magnesium metal matrix composite // Materials Science and Engineering: A. 2018. Vol. 711. P. 670–682.
12. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магниевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.

13. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В., Алиханян А.А. Исследование закономерностей влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства среднегабаритных поковок из жаропрочного магниевое сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
14. Rzychoń T., Dybowski B., Gryc A., Dudek M. Mechanical Properties and Microstructure of WE43 Magnesium Matrix Composite Reinforced SiC Particles // Archives of Foundry Engineering. 2015. Vol. 15. Special Issue 1/2015. P. 99–102.
15. Erman A., Groza J., Li X. et al. Nanoparticle effects in cast Mg–1 wt% SiC nano-composites // Material Science and Engineering: A. 2012. Vol. 558. P. 39–43.
16. Nie K.B., Wang X.J., Deng K.K. et al. Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles – A review // Journal of Magnesium and Alloys. 2012. Vol. 9. Is. 1. P. 57–77.
17. Yuan Q.H., Fu D.M., Zeng X.S., Yong L.I. Fabrication of carbon nanotube reinforced AZ91D composite with superior mechanical properties // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. Vol. 27. P. 1716–1724.
18. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Исследование влияния легирующих элементов на температурный порог воспламенения и огнестойкость деформируемого магниевое сплава марки ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
19. Guo Y.C., Nie K.B., Kang X.K. et al. Achieving high-strength magnesium matrix nanocomposite through synergistical effect of external hybrid (SiC+TiC) nanoparticles and dynamic precipitated phase // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 771. P. 847–856.
20. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 373–380.
21. You B.-S., Park W.-W., Chung I.-S. Effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys // Scripta Materialia. 2000. Vol. 42. Is. 11. P. 1089–1094.
22. Tekumalla S., Seetharaman S., Bau N. et al. Investigation on Microstructural and Mechanical Properties of Mg–0,4Ce/Y₂O₃ Nanocomposite // Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications, Mg2015. Cheju, 2015. P. 879–885.
23. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А., Акинина М.В., Алиханян А.А. Характерные особенности термической обработки композиционных материалов на основе магния и магниевых сплавов // Технология легких сплавов. 2024. № 3. С. 15–24.
24. Gupta V., Mishra R.K., Singh B. Effect of micro filler reinforcement on mechanical and wear characteristics of metal matrix composites: A review // 1st International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Nanotechnology (ICAMEN). New York, Melville: AIP Publishing, 2019. P. 030011. URL: <http://www.researchgate.net/publication/335591925> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10/1063/1.5123933.
25. Amalan P.A., Sivaram N.M. A state-of-the-art review on magnesium-based composite materials // Advances in Materials and Processing Technologies. 2023. Vol. 9. Is. 3. P. 760–778.
26. Zhang L., Wang Q., Liao W. et al. Effects of cyclic extrusion and compression on the microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium composites reinforced by SiC nanoparticles // Materials Characterization. 2017. Vol. 126. P. 17–27.
27. Wang X.J., Hu X.S., Liu W.Q. et al. Aging behavior of squeeze cast SiCw/AZ91 Mg matrix composites // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 682. P. 491–500.
28. Sun X.F., Wang C.J., Deng K.K. et al. Aging behavior of AZ91 matrix influenced by 5 μm SiCp: Investigation on the microstructure and mechanical properties // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 727. P. 1263–1272.
29. Zheng M.Y., Wu K., Kamado S. et al. Aging behavior of squeeze cast SiCw/AZ91 magnesium matrix composite // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 348. P. 67–75.
30. Amalan P.A., Sivaram N.M., Subramanya R. Influence of Silicon Carbide and Graphite Reinforcements and T6 Aging Heat Treatment on the Fatigue Characteristics of AZ91D Magnesium Alloy // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. Vol. 33 (2). P. 2751–2764. DOI: 10.1007/s11665-023-08154-3.

31. Khandelwal A., Mani K., Srivastava N. et al. Mechanical behavior of AZ31/Al₂O₃ magnesium alloy nanocomposites prepared using ultrasound assisted stir casting // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 123. P. 64–73.
32. Habibnejad-Korayem M., Mahmudi R., Poole W.J. Enhanced properties of Mg-based nanocomposites reinforced with Al₂O₃ nanoparticles // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 519. Is. 1-2. P. 198–203.
33. Mallmann C., Hannard F., Ferrié E. et al. Unveiling the impact of the effective particles distribution on strengthening mechanisms: A multiscale characterization of Mg+Y₂O₃ nanocomposites // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 764. Is. 1-2. P. 138170.
34. Zhang S., Li M., Wang H. et al. Microstructure and tensile properties of ECAPed Mg–9Al–1Si–1SiC composites: The influence of initial microstructures // *Materials*. 2018. Vol. 11. Is. 136. DOI: 10.3390/ma11010136.
35. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
36. Selvam J.D.-R., Dinaharan I., Rai R.S. Matrix and reinforcement materials for metal matrix and reinforcement material for composites // *Encyclopedia of Materials: Composites*. 2021. Vol. 2. P. 615–639. DOI: 10/1016/B978-0-12-803581-8.11890-9.
37. Kumar M., Gupta R.K. Study and properties of metal matrix composites // *Journal of Materials Processing Technology*. 1997. Vol. 63. Is. 1-3. P. 913–917.
38. Тимонова М.А. Коррозия и защита магниевых сплавов. М.: Машиностроение, 1964. 285 с.
39. Тимонова М.А. Защита от коррозии магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 158 с.
40. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов / под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия. 1972. 488 с.

References

1. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Sazonov M.A., Chernyshova T.A., Rokhlin L.L. Composite materials on a magnesium base reinforced with particles: manufacturing and properties (review). *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2010, no. 2, pp. 3–22.
4. Dey A., Pandey K.M. Magnesium metal matrix composites a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2015, vol. 42, is. 1, pp. 58–67.
5. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications. *Materials and Technologies*, 2019, vol. 53, is. 6, pp. 881–890.
6. Ali Y., Qiu D., Jiang B. et al. Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: a review article. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 619, pp. 639–651.
7. Song J.F., She J., Chen D.L., Pan F.S. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, vol. 8, pp. 1–41.
8. *Magnesium alloys: a handbook in 2 vols.* Eds M.B. Altman, A.F. Belov, V.I. Dobatkin et al. Moscow: Metallurgiya, 1978, vol. 1: Metallurgy of magnesium and its alloys. Application areas, 231 p.
9. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Leonov A.A., Alikhanyan A.A. Characteristic features of heat treatment of composite materials based on magnesium and magnesium alloys. Review. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2024, no. 3, pp. 15–24.
10. Mostyaev I.V., Akinina M.V. Features and development trends in the field of heat treatment of magnesium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 5. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-41-48.

11. Huang S.-J., Ali A.N. Effects of heat treatment on the microstructure and microplastic deformation behavior of SiC particles reinforced AZ61 magnesium metal matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 711, pp. 670–682.
12. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokozhukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
13. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Studies of the regularities of the heat treatment influence on the structure, phase composition and mechanical properties of medium-sized forgings made of heat-resistant alloy of the Mg–Zn–Zr–REE system. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
14. Rzychoń T., Dybowski B., Gryc A., Dudek M. Mechanical Properties and Microstructure of WE43 Magnesium Matrix Composite Reinforced SiC Particles. *Archives of Foundry Engineering*, 2015, vol. 15, special issue 1/2015, pp. 99–102.
15. Erman A., Groza J., Li X. et al. Nanoparticle effects in cast Mg–1 wt% SiC nano-composites. *Material Science and Engineering: A*, 2012, vol. 558, pp. 39–43.
16. Nie K.B., Wang X.J., Deng K.K. et al. Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles – A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2012, vol. 9, is. 1, pp. 57–77.
17. Yuan Q.H., Fu D.M., Zeng X.S., Yong L.I. Fabrication of carbon nanotube reinforced AZ91D composite with superior mechanical properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, vol. 27, pp. 1716–1724.
18. Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A. Investigation of the influence of alloying elements on the temperature threshold of ignition and fire resistance of a VMD16 wrought magnesium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
19. Guo Y.C., Nie K.B., Kang X.K. et al. Achieving high-strength magnesium matrix nanocomposite through synergistical effect of external hybrid (SiC+TiC) nanoparticles and dynamic precipitated phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 771, pp. 847–856.
20. Kablov E.N., Shchetanov B.V., Grashhenkov D.V., Shavnev A.A., Nyafkin A.N. Metalmatrix composite materials on the basis of Al–SiC. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 373–380.
21. You B.-S., Park W.-W., Chung I.-S. Effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 2000, vol. 42, is. 11, pp. 1089–1094.
22. Tekumalla S., Seetharaman S., Bau N. et al. Investigation on Microstructural and Mechanical Properties of Mg–0.4Ce/Y₂O₃ Nanocomposite. *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications, Mg2015*. Cheju, 2015, pp. 879–885.
23. Volkova E.F., Duyunova V.A., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Characteristic features of heat treatment of composite materials based on magnesium and magnesium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2024, no. 3, pp. 15–24.
24. Gupta V., Mishra R.K., Singh B. Effect of micro filler reinforcement on mechanical and wear characteristics of metal matrix composites: A review. *1st International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Nanotechnology (ICAMEN)*. New York, Melvill: AIP Publishing, 2019, p. 030011. Available at: <http://www.researchgate.net/publication/335591925> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10/1063/1.5123933.
25. Amalan P.A., Sivaram N.M. A state-of-the-art review on magnesium-based composite materials. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2023, vol. 9, is. 3, pp. 760–778.
26. Zhang L., Wang Q., Liao W. et al. Effects of cyclic extrusion and compression on the microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium composites reinforced by SiC nanoparticles. *Materials Characterization*, 2017, vol. 126, pp. 17–27.
27. Wang X.J., Hu X.S., Liu W.Q. et al. Aging behavior of squeeze cast SiCw/AZ91 Mg matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 682, pp. 491–500.

28. Sun X.F., Wang C.J., Deng K.K. et al. Aging behavior of AZ91 matrix influenced by 5 μm SiCp: Investigation on the microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 727, pp. 1263–1272.
29. Zheng M.Y., Wu K., Kamado S. et al. Aging behavior of squeeze cast SiCw/AZ91 magnesium matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 348, pp. 67–75.
30. Amalan P.A., Sivaram N.M., Subramanya R. Influence of Silicon Carbide and Graphite Reinforcements and T6 Aging Heat Treatment on the Fatigue Characteristics of AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33 (2), pp. 2751–2764. DOI: 10.1007/s11665-023-08154-3.
31. Khandelwal A., Mani K., Srivastava N. et al. Mechanical behavior of AZ31/ Al_2O_3 magnesium alloy nanocomposites prepared using ultrasound assisted stir casting. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 64–73.
32. Habibnejad-Korayem M., Mahmudi R., Poole W.J. Enhanced properties of Mg-based nanocomposites reinforced with Al_2O_3 nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 519, is. 1-2, pp. 198–203.
33. Mallmann C., Hannard F., Ferrié E. et al. Unveiling the impact of the effective particles distribution on strengthening mechanisms: A multiscale characterization of $\text{Mg}+\text{Y}_2\text{O}_3$ nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 764, is. 1-2, p. 138170.
34. Zhang S., Li M., Wang H. et al. Microstructure and tensile properties of ECAPed Mg–9Al–1Si–1SiC composites: The influence of initial microstructures. *Materials*, 2018, vol. 11, is. 136. DOI: 10.3390/ma11010136.
35. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
36. Selvam J.D.-R., Dinaharan I., Rai R.S. Matrix and reinforcement materials for metal matrix and reinforcement material for composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2021, vol. 2, pp. 615–639. DOI: 10/1016/B978-0-12-803581-8.11890-9.
37. Kumar M., Gupta R.K. Study and properties of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 63, is. 1-3, pp. 913–917.
38. Timonova M.A. *Corrosion and protection of magnesium alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 285 p.
39. Timonova M.A. *Protection from corrosion of magnesium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 158 p.
40. Emli E.F. *Fundamentals of technology of production and processing of magnesium alloys*. Ed. M.E. Drits. Moscow: Metallurgiya, 1972, 488 p.

Информация об авторах

Волкова Екатерина Федоровна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Акинина Мария Владимировна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мостяев Игорь Владимирович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Алиханян Арман Артакович, инженер I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Ekaterina F. Volkova, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria V. Akinina, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor V. Mostyaev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Arman A. Alihanyan, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 28.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.06.2025.

The article was submitted 28.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.06.2025.