

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-25-41

СИСТЕМА «МАГНИЙ–ГАДОЛИНИЙ» – НОВЫЙ ШАГ В РАЗВИТИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е.Ф. Волкова¹, М.В. Акинина¹, И.В. Мостяев¹, В.А. Дуюнова¹, А.А. Алиханян¹

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

Аннотация. Приведен анализ научно-технических публикаций в области разработки новых магниевых сплавов. Установлено, что наиболее активные исследования проводятся в отношении сплавов, содержащих гадолиний в качестве основного легирующего компонента. Показано, что сплавы систем Mg–Gd–Y–Zn–Zr, Mg–Gd–Y–Zn (содержащие длиннопериодные фазы), а также систем Mg–Gd–Y–Zr и Mg–Gd–Zr–Ag перспективны в случае применения к ним нестандартных технологий и схем обработки: комплексной технологической цепочки, включающей различные виды деформации и термической обработки; технологий ротационнойковки, электродуговой наплавки проволоки и др.

Ключевые слова: длиннопериодные фазы, гадолиний, двойная экструзия, метод ротационнойковки, электродуговая наплавка проволоки, эволюция микроструктуры, интерметаллидные фазы

Для цитирования: Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Дуюнова В.А., Алиханян А.А. Система «магний–гадолиний» – новый шаг в развитии перспективных магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 25–41. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-25-41.

Scientific article

THE MAGNESIUM–GADOLINIUM SYSTEM IS A NEW STEP IN THE DEVELOPMENT OF PROMISING MAGNESIUM ALLOYS

E.F. Volkova¹, M.V. Akinina¹, I.V. Mostyaev¹, V.A. Duyunova¹, A.A. Alikhanyan¹

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 provides an analysis of scientific and technical publications on the development of new magnesium alloys. It has been established that the most intensive research is conducted on alloys containing gadolinium as the main alloying component. It has been shown that alloys of the Mg–Gd–Y–Zn–Zr, Mg–Gd–Y–Zn (containing long-period stacking ordered phase) systems, as well as the systems: Mg–Gd–Y–Zr, Mg–Gd–Zr–Ag are very promising in the case of applying non-standard technologies and processing schemes to them: a complex technological chain, including various types of deformation and heat treatment; technology of rotary pressing; modern technology of wire-arc directed energy deposition, etc.

Keywords: long-period stacking ordered phase, gadolinium, double extrusion, the method of rotary swaging, wire-arc directed energy deposition, evolution of the microstructure, intermetallic phase

For citation: Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Duyunova V.A., Alikhanyan A.A. The magnesium–gadolinium system is a new step in the development of promising magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 25–41. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-25-41.

Введение

Деформируемые магниевые сплавы давно и успешно применяются в первую очередь в авиастроении и космической промышленности, где востребованы материалы с небольшой плотностью и хорошим уровнем прочностных и демпфирующих свойств. Эти сплавы используются для изготовления деталей конструкции планера, фюзеляжа, сидений, панелей, отсеков, структурных деталей (кронштейнов, креплений и рам летательных аппаратов), а также изделий для высокоскоростного железнодорожного транспорта, которые могут испытывать высокое механическое напряжение [1–5].

Однако исследователи отмечают, что наряду с известными преимуществами сплавы на основе магния отличаются недостаточно высоким уровнем прочностных и пластических характеристик. Эти недостатки ограничивают их более широкое применение в ряде ответственных отраслей промышленности.

В начале XXI в. все большее распространение приобретают новые магниевые сплавы, легированные редкоземельными металлами (РЗМ). Эти элементы позволяют существенно улучшить определенные механические и технологические характеристики магниевых сплавов и, соответственно, значительно повысить их конкурентоспособность [6–11].

В фокусе исследования в последние годы находятся магниевые сплавы, включающие так называемые длиннопериодные (Long-Period Stacking Ordered (LPSO)) фазы. Они формируются в сплавах, содержащих в качестве легирующих компонентов некоторые РЗМ иттриевой подгруппы и цинк в определенных соотношениях.

Результаты анализа публикаций и обсуждение

Магниевые сплавы LPSO-класса выявлены японскими учеными [12–18]. Наличие самоорганизующихся LPSO-фаз и их положительное влияние на механические, коррозионные свойства и свариваемость сплавов на основе магния также изучены и подтверждены в работах отечественных исследователей [19, 20].

Совершенствование конструкционных материалов может происходить по следующим основным направлениям: оптимизация состава сплавов, разработка новых эффективных технологий изготовления деформированных полуфабрикатов из этих сплавов, комбинированное применение современных технологий и новых составов [20].

Интенсивные исследования магниевых сплавов, содержащих РЗМ, проводятся в настоящее время специалистами многих стран: КНР, Японии, США, Южной Кореи, Арабской Республики Египет и др.

Большой интерес вызывает гадолиний – элемент иттриевой подгруппы РЗМ, который является одним из наиболее значимых по своему влиянию на свойства магниевых сплавов. В последние годы гадолиний стал более широко использоваться для легирования магниевых сплавов, поскольку разработаны и применяются доступные технологии раздельного извлечения РЗМ из полиметаллических руд, облегчающие и удешевляющие использование отдельных металлов из этой группы. Изучается также необходимость введения дополнительных легирующих элементов в состав этих сплавов, что требуется для формирования LPSO-фаз [21–23].

Активно изыскиваются возможные пути улучшения механических характеристик магниевых сплавов с гадолинием.

Проведены глубокие изыскания (в основном китайскими исследователями) в области разработки сплавов системы Mg–Gd–Y–Zn [24–29], содержащих LPSO-фазы. Установлено, что повышенные прочностные характеристики этих сплавов могут быть обусловлены не только наличием LPSO-фаз, но и формированием наночастиц других фаз (призматических, осадочных и базальных), содержащих гадолиний, а также возникающими дефектами упаковки.

Использование комплексной обработки не только приводит к измельчению зерна, но и повышает устойчивость сплавов к локализации деформаций.

При исследовании микроструктуры на оптическом микроскопе обнаружено изменение размеров зерен и их морфологии в сплаве состава Mg–10,5Gd–2,5Y–1,5Zn–0,5Zr в состояниях после однократной экструзии и двойной экструзии, а также после горячей прокатки и старения по оптимальному режиму (рис. 2).

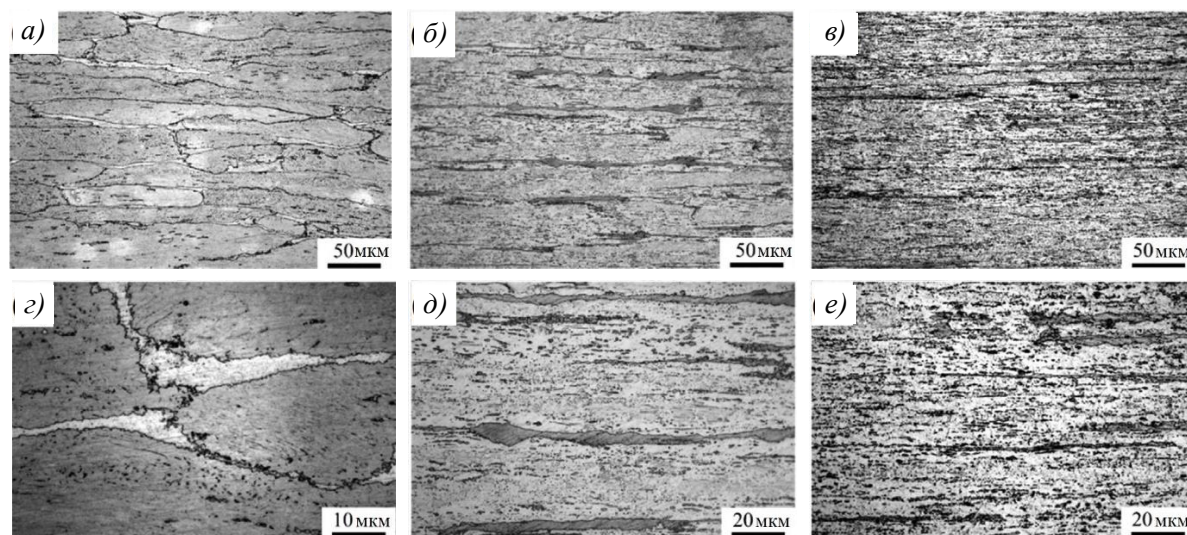


Рис. 2. Микроструктуры (оптическая микроскопия при различных увеличениях) магниевого сплава состава Mg–10,5Gd–2,5Y–1,5Zn–0,5Zr после однократной (а, с) и двойной (б, д) экструзии, горячей прокатки и старения по оптимальному режиму (е, е) [24]

После однократной экструзии в сплаве формируются мелкие равноосные зерна, однако сохраняются и более крупные деформированные зерна. Для этого состояния характерно наличие значительной разнорзернистости. При этом средний размер зерен равен ~3,5 мкм (рис. 2, а, с). После повторной экструзии оставшиеся в результате первичной деформации более крупные зерна подвергались дальнейшему измельчению и одновременно удлинились. В результате сформировались зерна со средним размером ~2,5 мкм. Тем не менее небольшая часть этих зерен все еще сохраняла большие размеры (рис. 2, б, д). Затем сплав подвергли горячей прокатке и последующему старению по оптимальному режиму. В этом случае средний размер зерен значительно уменьшился и составил ~1,8 мкм. Прокатка привела к практически полному исчезновению крупных зерен, в результате чего образовалась микроструктура, состоящая в основном из утонченных удлиненных зерен (рис. 2, е, е).

Подробное изучение микроструктуры методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии позволило установить, что сплав содержит LPSO-фазу.

Фазовый состав сплавов системы Mg–Gd–Y–Zn–Zr в различных состояниях дополнительно анализировали по результатам исследования на рентгеновском дифрактометре, работающем при напряжении 60 кВ и скорости сканирования 2 градуса/мин в диапазоне температур 20–100 °С (рис. 3).

В работе [25] сообщается о высокой прочности и пластичности сплавов LPSO-класса той же системы Mg–Gd–Y–Zn–Zr. Сплавы подвергли воздействию, вызвавшему формирование текстуры в деформированном полуфабрикате при протекании динамического фазообразования и последующего выделения фаз во время горячей деформации.

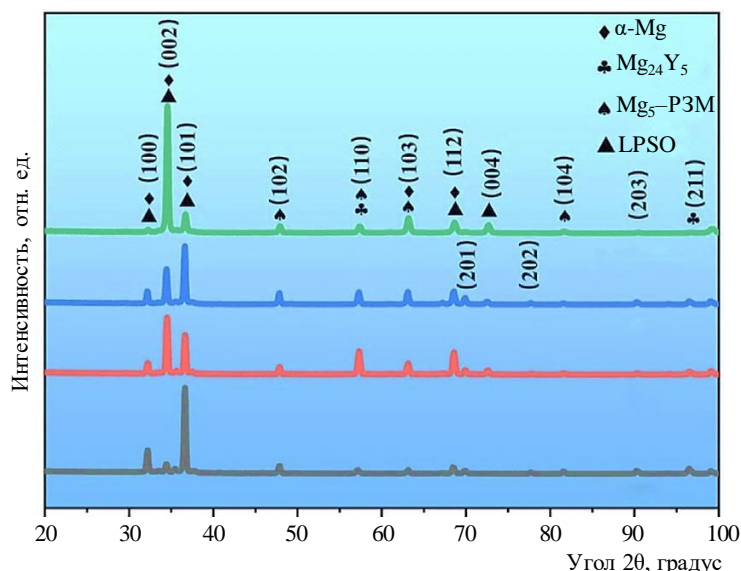


Рис. 3. Результаты рентгеноспектрального анализа структуры сплава системы Mg–Gd–Y–Zn–Zr после литья с гомогенизационным отжигом (—), однократной (—) и двойной (—) экструзии, горячей прокатки и старения по оптимальному режиму (—) [24]. LPSO – длиннопериодные фазы

Китайские исследователи при изучении сплавов указанной системы предложили новый высокопрочный сложнолегированный сплав марки GW83K на основе магния. Деформированные полуфабрикаты из этого сплава получены методом ротационнойковки в процессе обработки на ротационно-ковочной машине. Обнаружено, что значения предела прочности (710 МПа), предела текучести (650 МПа) и относительного удлинения (4,5 %) этого сплава после указанной обработки достигают максимально высоких значений, сопоставимых с уровнем свойств высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов. Анализ механических характеристик сплава после деформации показал, что столь высокие показатели получены в первую очередь благодаря наличию гадолиния, способствующему совместно с цинком и магнием образованию LPSO-фаз и других фаз типа $Mg_5(Gd, Y)$ [25, 26].

Результаты исследования [27] показали, что сплав состава Mg–14Gd–0,5Zr после максимальной выдержки при старении обладает высокими значениями прочностных характеристик: предел прочности ~482 МПа, предел текучести ~445 МПа. Однако полученный уровень относительного удлинения (2 %) не может рассматриваться как удовлетворительный. Кроме того, к недостаткам этого сплава следует отнести высокое содержание дорогостоящего РЗМ – гадолиния.

Для повышения прочностных свойств в процессе старения магниево-гадолиниевых сплавов к сплаву состава Mg–13,1Gd–0,4Zr добавлено небольшое количество серебра (1,6 % (по массе)). Установлено, что механические характеристики этого сплава значительно улучшились: пределы прочности и текучести достигли значений ~515 и ~421 МПа соответственно. Однако относительное удлинение составило ~3,1 % [28]. Следует отметить, что достижение столь высокого уровня прочностных характеристик за счет увеличения содержания гадолиния и введения серебра сопряжено со значительным удорожанием магниевое сплава и может служить препятствием для его практического применения в качестве конструкционного материала.

Сплав нового состава Mg–12Gd–3Y–0,4Zr в катаном и состаренном по оптимальному режиму состоянии также продемонстрировал высокий уровень механических свойств при растяжении. Пределы прочности и текучести достигли ~458 и ~343 МПа соответственно. Значение относительного удлинения в сплаве составило ~3,8 % [29].

Отечественные исследователи [30] в сплаве состава Mg–4,7Y–4,6Gd–0,3Zr исследовали механизм старения и возврата. Анализ значений твердости по Бринеллю, удельного электрического сопротивления и результатов просвечивающей электронной микроскопии позволил изучить распад перенасыщенного твердого раствора на основе магния в сплаве, содержащем два РЗМ – иттрий и гадолиний. Исследованы изменения микроструктуры и свойств в указанном сплаве в процессе старения и рассмотрена возможность возврата после старения. Установлено, что данный сплав значительно упрочняется при старении после горячей экструзии (прессования) вследствие распада пересыщенного твердого раствора на основе магния, который протекает в следующей последовательности. Сначала образуется пересыщенный твердый раствор, затем формируются упорядоченные зоны, появляются фазы β'' (D019) и Mg_3Gd , после чего выделяются фазы β' (cbco) и Mg_7Gd , и, наконец, образуются фазы с объемно-центрированной кубической решеткой и Mg_5Gd . Выделения отдельных призматических наноразмерных фаз способствуют формированию структурных областей в сплаве с высокой микротвердостью. Установлено, что максимальные прочностные характеристики достигаются при старении сплава при температуре 200 °С после выдержки в течение 64 ч.

Авторы также пришли к выводу, что сплав состава Mg–4,7Y–4,6Gd–0,3Zr имеет тенденцию к возврату после старения, когда его подвергают последующему отжигу при температурах, превышающих температуру старения. Выявлена зависимость прохождения возврата после старения от температуры и продолжительности выдержки при отжиге. Процесс возврата сопровождается растворением ранее выделившихся фаз, что приводит к повышению пластических характеристик сплава одновременно со снижением прочностных свойств. Эффект от процесса возврата усиливается с повышением температуры отжига.

Известно, что из сплавов на основе магния, легированных РЗМ, проблематично изготовить детали сложной формы с помощью известных серийных технологий литья [31, 32]. При традиционном процессе литья возникают такие дефекты, как горячие трещины, неслитины и др. [33].

Производство объемных и крупногабаритных деталей с использованием аддитивных технологий в последнее время стало рассматриваться как наиболее прогрессивный метод обработки сплавов системы Mg–РЗМ благодаря возможности быстрого формообразования без использования специальной оснастки. При этом значительные успехи достигнуты при разработке магниевых сплавов, содержащих гадолиний в качестве основного легирующего компонента [34, 35].

Для получения сплавов системы Mg–РЗМ наиболее широко применяют следующие аддитивные технологии: лазерное наплавление в порошковом слое (Laser Powder Bed Fusion), также известное как селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting) [36–39], лазерное напыление с направленной энергией (Laser Directed Energy Deposition) [40] и электродуговую наплавку проволоки (Wire-Arc Directed Energy Deposition (WA-DED)) [41–50]. Лазерам присущи высокая отражательная способность и низкая эффективность осаждения, что может в значительной мере ограничивать практическое применение лазерного сплавления и лазерного напыления с направленной энергией. В результате акцент исследований в области получения крупногабаритных деталей и полуфабрикатов из сложнолегированных сплавов системы Mg–РЗМ смещается в сторону процесса WA-DED.

В настоящее время сплавы системы Mg–Gd–Y–Zr (серия GW) являются одними из наиболее часто используемых сплавов системы Mg–РЗМ для проведения научных исследований в области аддитивных технологий, оптимизации составов и их дальнейшего промышленного применения.

Например, сплавы составов Mg–6Gd–3Y–0,5Zr (GW63K) и Mg–10Gd–2Y–0,5Zr (GW102K) разработаны и исследованы авторами работ [45, 48] с использованием метода холодного переноса металла (Cold Metal Transfer). Сравнивая полученные результаты, можно установить, что содержание гадолиния влияет не только на характеристики микроструктуры, такие как морфология и топология эвтектических фаз, но и на растворимость легирующих компонентов в α -твердом растворе на основе магния и характер нановыделений фаз *in situ* в процессе старения. Гадолиний оказывает влияние на механизмы упрочнения и разрушения, а также на другие микро- и макропроцессы в данных сплавах.

В работе [41] изучено влияние гадолиния на эволюцию микроструктуры и механические характеристики сплавов системы Mg–Gd–Y–Zr после проведения WA-DED и последующей термообработки. Авторы представили результаты масштабных исследований характеристик микроструктуры и определения механических свойств сплавов состава Mg– x Gd–2Y–0,5Zr (где $x = 4, 7, 10$). Морфология поверхности заготовок, выполненных из этих сплавов, схема отбора и размеры образцов для исследования показаны на рис. 4. Образцы вырезали в перпендикулярном (Transverse Direction – TD) и параллельном (Building Direction – BD) оси построения направлениях.

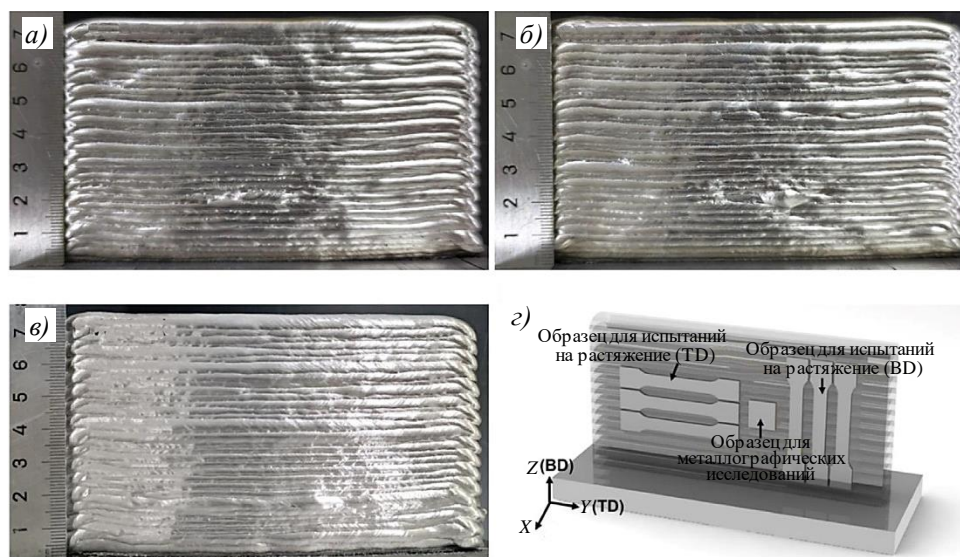


Рис. 4. Морфология поверхности наплавленных сплавов GW42K (а), GW72K (б), GW102K (в) и места отбора образцов (в перпендикулярном (TD) и параллельном (BD) оси построения направлениях) для испытаний на растяжение и металлографических исследований (г) [41]

Испытания на растяжение при комнатной температуре проводили на универсальной механической испытательной машине (СМТ-5105) с постоянной скоростью деформации 0,6 мм/мин.

Как выявлено ранее, сплавы системы Mg–Gd–Y–Zr характеризуются значительным эффектом упрочнения при старении, поэтому к образцам, полученным по технологии WA-DED, для оптимизации механических свойств применен полный цикл термообработки, включающий два основных этапа:

- обработку на твердый раствор с последующей закалкой в воде;
- искусственное старение с охлаждением в воздушной среде.

Схематическое изображение размеров образцов для испытания на растяжение и последовательность термообработки показаны на рис. 5.

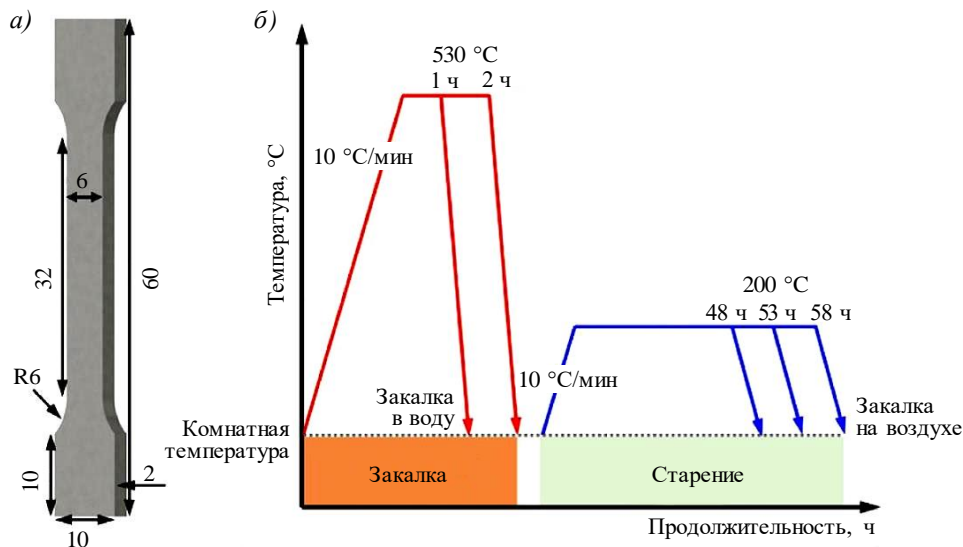


Рис. 5. Размеры образцов (мм) из сплава системы Mg–Gd–Y–Zr для испытаний на растяжение (а) и схема проведения термообработки (б) [41]

По результатам исследований [42, 45] установлено, что оптимальная температура нагрева сплава для обработки по режиму T4 (закалка) составляет 530 °С. Оптимальная продолжительность выдержки при закалке определена по степени укрупнения зерен. В работе [41] доказано, что продолжительность выдержки при температуре закалки на твердый раствор (Т4) составляет 1 и 2 ч. Это позволяет изучить влияние содержания гадолиния на возможный аномальный рост зерен во время обработки по режиму T4. Оптимальная температура последующей обработки старением составляет 200 °С [42, 45], а продолжительность выдержки определена по моменту достижения максимальной микротвердости основных интерметаллидных фаз сплава. Полный цикл термообработки (Т6) проводили в атмосфере аргона, а скорость нагрева составила 10 °С/мин (рис. 5) [41].

Изучено влияние содержания гадолиния на свойства магниевых сплавов серии GW в различных состояниях при растяжении при комнатной температуре (см. таблицу). Для образцов в исходном состоянии (после наплавления) и после закалки и старения (Т6) пределы текучести и прочности при растяжении постепенно возрастают по мере увеличения содержания гадолиния, в то время как относительное удлинение, соответственно, уменьшается.

Однако для образцов в состоянии после закалки (Т4) изменение содержания гадолиния существенно не повлияло на свойства при растяжении. Анализ результатов (см. таблицу) показал, что прочность при растяжении в обоих направлениях практически одинакова, в то время как пластичность при испытании в TD-направлении больше по сравнению с VD-направлением. Согласно результатам, изложенным в статье [44], это явление можно объяснить тем фактом, что дефекты в изготовленном материале распределены особым образом.

После обработки по режиму T4 пределы текучести и прочности трех составов сплавов составили ~130 и ~235 МПа соответственно, относительное удлинение достигло ~15 %.

Максимальные значения прочностных характеристик отмечены для образцов из сплава GW102K в состоянии после полного цикла термообработки, вырезанных в направлении как VD, так и TD. Пределы прочности и текучести составили 367–371 и 239–243 МПа соответственно. Однако величина относительного удлинения этого сплава в состоянии Т6 снизилась до ~4 %.

Влияние гадолиния на механические свойства сплавов системы Mg–Gd–Y–Zr, изготовленных по технологии электродуговой наплавки проволоки [41]

Сплав	Состав, % (по массе)	Состояние	Предел текучести, МПа		Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	
			BD	TD	BD	TD	BD	TD
GW42K	Mg–4,43Gd–2,28Y–0,49Zr	Исходное (после наплавления)	135±1,2	129±0,6	232±1,2	232±1,2	10,7±0,3	12,4±0,2
		T4	126±1,5	122±1,0	230±1,5	226±1,5	14,6±0,6	15,6±0,1
		T6	216±1,2	217±1,2	314±3,0	316±2,1	4,0±0,3	4,7±0,2
GW72K	Mg–7,36Gd–2,34Y–0,46Zr	Исходное (после наплавления)	148±1,5	144±1,5	240±1,2	243±2,1	10,4±0,2	12,3±0,2
		T4	129±1,0	127±0,6	235±1,5	236±1,0	14,1±0,2	15,2±0,2
		T6	230±1,0	229±1,5	331±6,6	337±1,0	4,2±0,6	4,8±0,2
GW102K	Mg–10,39Gd–2,18Y–0,45Zr	Исходное (после наплавления)	151±4,6	149±3,2	240±3,9	247±4,0	6,1±1,6	8,1±0,7
		T4	132±1,2	129±0,6	241±1,5	238±1,5	14,4±0,1	14,6±0,1
		T6	243±1,0	239±1,0	367±1,0	371±1,5	3,9±0,2	4,0±0,2

Примечание. Механические свойства при растяжении определены в параллельном (BD) и перпендикулярном (TD) оси построения направлениях, которые соответствуют направлениям, приведенным на рис. 4. Представлены средние результаты при испытании трех образцов.

Для получения более четкого представления о процессах, происходящих в структуре новых сплавов системы Mg–Gd–Y–Zr, изготовленных по технологии WA-DED, исследовано влияние термической обработки на их микроструктуру. Образцы для металлографических исследований вырезаны из тонкостенных заготовок методом электроэрозионной резки. Для изучения процессов осаждения (выпадения) нанодисперсных частиц фаз, распределения в них элементов и подробного исследования тонкой структуры использованы просвечивающий электронный микроскоп, энергодисперсионный спектрометр и сканирующий электронный микроскоп.

Размер шага сканирования для дифракции обратного рассеяния электронов установлен равным 2 мкм. Размер зерна и характеристики границ зерен получены путем анализа данных дифракции обратного рассеяния электронов с использованием программного обеспечения.

На рис. 6 и 7 представлены результаты исследования микроструктуры и данные рентгеноструктурного анализа сплавов состава Mg–*x*Gd–2Y–0,5Zr (где *x* = 4, 7, 10), полученные после распада твердого раствора в результате проведения термообработки.

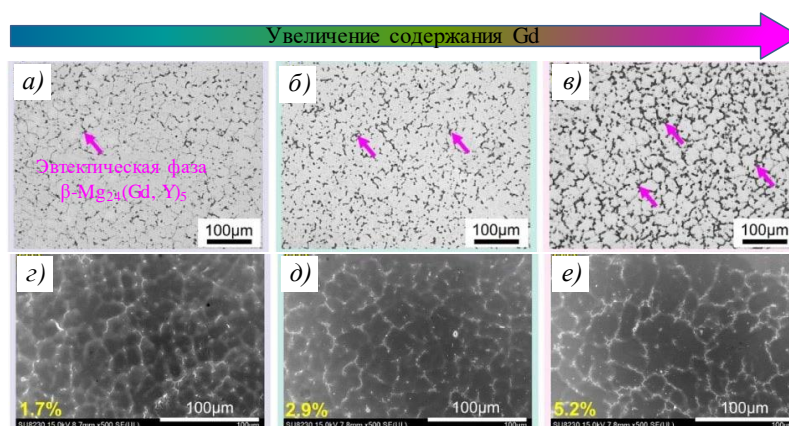


Рис. 6. Эволюция эвтектической фазы в образцах из сплавов GW42K (а, з), GW72K (б, д), GW102K (в, е), изготовленных по технологии электродуговой наплавки проволоки. Изображения получены с помощью оптической (а–в) и сканирующей электронной микроскопии (з–е) [41]

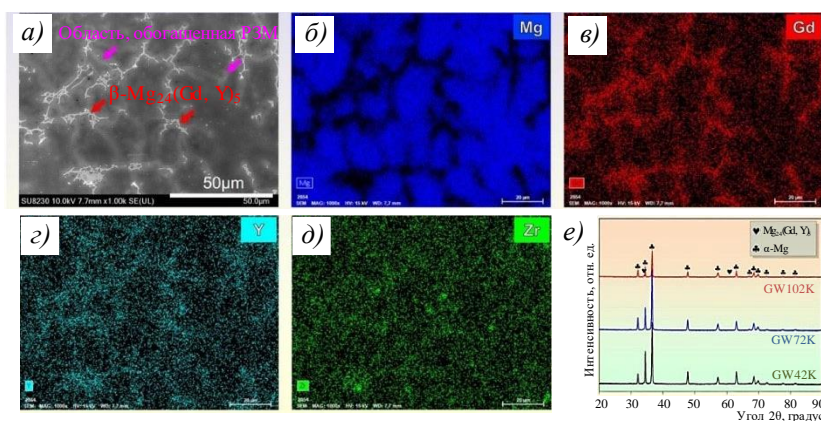


Рис. 7. Изображение, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (а) и соответствующие результаты исследования микроструктуры сплава GW102K с помощью энергодисперсионного спектрометра (б–д), изменения характера рентгенограмм образцов из сплавов GW42K, GW72K, GW102K после осаждения (выпадения) нанодисперсных интерметаллидных фаз (е)

Как показано на рис. 6, а–в, металлографическая структура сплавов состоит преимущественно из α -твердого раствора на основе магния и частиц эвтектических фаз, распределенных по границам зерен. Согласно результатам исследования микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии, при увеличении содержания гадолиния с 4 до 7 % (по массе), а затем до 10 % (по массе) тип эвтектической фазы постоянен, в то время как ее морфология изменяется с островкообразной до прерывистой стержнеобразной, а затем до непрерывной сетки (рис. 6, з–е).

Следует отметить, что не все магниевые сплавы системы легирования Mg–Gd–Y относятся к LPSO-классу. Несмотря на наличие РЗМ (гадолиния и иттрия), некоторые сплавы не содержат других необходимых легирующих компонентов (в частности, цинка). Поэтому повышение прочностных характеристик после проведения полного цикла термообработки протекает в этих сплавах по обычному механизму.

Результаты статистической обработки данных свидетельствуют об изменении содержания эвтектической фазы с 1,7 % в сплаве GW42K до 2,9 % в сплаве GW72K, а затем до 5,2 % в сплаве GW102K [41].

Изображение, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, и соответствующие результаты энергодисперсионного картирования представлены на рис. 7 в трехмерном изображении. На рис. 7, а показаны области, обогащенные РЗМ, и распределение частиц эвтектической фазы β -Mg₂₄(Gd, Y)₅.

Отмечены области α -твердого раствора на основе магния (рис. 7, б), а также области, расположенные вдоль границ зерен и обогащенные легирующими компонентами: гадолинием (рис. 7, в), иттрием (рис. 7, з) и цирконием (рис. 7, д).

Фазовый состав сплавов в различных условиях анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра, работающего при напряжении 60 кВ и скорости сканирования 2 градуса/мин в диапазоне температур 20–100 °С.

Результаты фазового анализа подтвердили, что увеличение содержания гадолиния не влияет на тип осаждения эвтектической фазы. Следует отметить, что нанодисперсные частицы фаз и частицы вторичных фаз субмикронного масштаба, присутствующие в сплаве системы Mg–Gd–Y–Zr, не выявлены с помощью сканирующей электронной микроскопии.

При увеличении содержания гадолиния с 4 до 10 % (по массе) морфология эвтектической фазы β -Mg₂₄(Gd, Y)₅ изменяется с прерывистой формы до непрерывной

сетчатой. Площадь области, обогащенной нанодисперсной β -фазой и эвтектической фазой, значительно увеличивается. Кроме того, повышенное содержание гадолиния приводит к измельчению зерна за счет увеличения количества центров зарождения нанодисперсных интерметаллидных фаз.

Во время обработки на твердый раствор с последующей закалкой увеличение содержания гадолиния вызывает эффективное подавление роста зерен за счет более высокого содержания эвтектической фазы и большей области обогащения.

В то же время изменение содержания гадолиния практически не влияет на свойства образцов в состоянии Т4 (закалка) при растяжении при комнатной температуре, поскольку существует лишь незначительная разница в упрочнении раствора в закаленном состоянии.

После проведения старения повышенное содержание гадолиния приводит к возрастанию количества нанодисперсных выделений β' -фазы. Одновременно с увеличением содержания гадолиния с 4 до 10 % (по массе) в сплавах в состоянии Т6 (закалка + старение) происходит заметное возрастание пределов прочности (на ~ 12 %) и текучести (на ~ 17 %) в ВD- и TD-направлениях (см. таблицу).

Заключения

В настоящее время магниево-гадолиниевые сплавы получили широкое распространение. Разрабатываются новые сплавы систем легирования Mg–Gd–Y–Zn–Zr и Mg–Gd–Y–Zn (сплавы LPSO-класса), а также систем Mg–Gd–Y–Zr, Mg–Gd–Zr–Ag и др.

Изучается возможность применения сложных и нестандартных технологических схем обработки.

Максимальный уровень механических характеристик при растяжении деформированных полуфабрикатов получен для сплава LPSO-класса марки GW83K после обработки по методу ротационнойковки: $\sigma_b \approx 710$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 650$ МПа, $\delta \approx 4,5$ %. Высокие прочностные характеристики обусловлены наличием LPSO-фаз и формированием наночастиц фаз (призматических, осадочных и базальных), содержащих гадолиний, в частности фазы β -Mg₂₄(Gd, Y)₅ с дисперсным характером зеренной структуры.

Сложный технологический цикл обработки сплавов системы Mg–Gd–Y–Zn–Zr, включающий различные виды деформации и термической обработки, позволяет получить полуфабрикаты с практически изотропными свойствами: $\sigma_b \geq 370$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 220$ МПа, $\delta \geq 8,0$ %.

Использование современной технологии WA-DED для сплавов системы Mg–Gd–Y–Zr эффективно при изготовлении объемных тонкостенных деталей сложной формы.

Интенсивность проведения работ, направленных на изучение магниево-гадолиниевых сплавов, свидетельствует об их конкурентоспособности и перспективности.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
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. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов / под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1972. 488 с.

4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
5. Magnesium alloys for aerospace market transformation and outlook // Market Research Intellect: An international provider of market research reports. URL: <http://www.marketresearchintellect.com> (дата обращения: 02.02.2026).
6. Магниеые сплавы: справочник в 2 ч. / под ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 1. Металловедение магния и его сплавов. Области применения. 232 с.
7. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Сравнительные исследования структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). С. 36–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.
8. Волкова Е.Ф., Леонов А.А., Акинина М.В., Мостяев И.В., Алиханян А.А. Редкоземельные металлы и прогресс в области деформируемых магниеых сплавов. Обзор // Технология легких сплавов. 2025. № 4. С. 23–38.
9. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Исследование влияния легирующих элементов на температурный порог воспламенения и огнестойкость деформируемого магниевого сплава марки ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 60–74. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
10. 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 сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). С. 13–26. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
11. Карачевцев Ф.Н., Ерощкин С.Г., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Поповнина Н.А. Разработка стандартных образцов состава магниевого сплава МЛ19 // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). С. 26–34. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-26-34.
12. Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg–Zn–Y Alloys with 14H Long Period Ordered Structure // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. P. 959–965.
13. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure // Materials Transactions. 2007. Vol. 48. Is. 11. P. 2986–2992.
14. Hagihara K., Yokotani N., Umakoshi Y. Plastic deformation behavior of Mg₁₂Y₂Zn with 18R long-period stacking ordered structure // Intermetallics. 2010. Vol. 18. P. 267–276.
15. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. P. 6282–6293.
16. Noda M., Matsumoto R., Kawamura Y. Forging Induces Changes in the Formability and Microstructure of Extruded Mg₉₆Zn₂Y₂ Alloy with a Long-Period Stacking Order Phase // Material Science and Engineering A. 2013. Vol. 563. P. 21–27.
17. Hagihara K., Kinoshita A., Fukusumi Y. et al. Hightemperature compressive deformation behavior of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy containing a long period stacking ordered (LPSO) phase // Materials Science and Engineering A. 2013. Vol. 560. P. 71–79.
18. Yasuda N., Kimura S. Measurement of Thermal Expansion Coefficient of 18R-Synchronized Long-Period Stacking Ordered Magnesium Alloy // Materials Transactions. 2016. Vol. 57. Is. 6. P. 1010–1013.
19. Volkova E.F., Antipov V.V., Zavadov A.V. A Study of the Fine Structure and Phase Composition of Magnesium Alloy VMD16 in Cast and Homogenized Conditions // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Vol. 61 (19). P. 143–148.
20. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Овсянников Б.В. Современные деформируемые магниеые сплавы: состояние и перспективы применения в высокотехнологичных отраслях промышленности: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2021. 392 с.

21. Мостяев И.В. Исследование влияния технологических параметровковки, штамповки и термической обработки на структуру, фазовый состав и уровень свойств деформированных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава марки ВМД16: дис. ... канд. техн. наук. М., 2024. 153 с.
22. Леонов А.А. Литейные магниевые сплавы системы Mg–P3Э–Zr с повышенной температурой воспламенения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2024. 125 с.
23. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магневых деформируемых сплавов // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). С. 15–23. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
24. Wang J., Khan M.A., Dai S. et al. Effect of double-extrusion following by stepwise-hot-rolling on microstructures and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2025. Vol. 13. Is. 9. P. 4327–4345.
25. Zhao X., Yang Z., Zhang J. et al. Formation and transformation of metastable LPSO building blocks clusters in Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloys by spinodal decomposition and heterogeneous nucleation // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2024. Vol. 12. Is. 2. P. 673–686.
26. Liu H., Xue F., Bai J. et al. Formation Behavior of 14H Long Period Stacking Ordered Structure in Mg–Y–Zn Cast Alloys with Different α -Mg Fractions // *Journal of Materials Science & Technology*. 2016. Vol. 32. Is. 12. P. 1267–1273.
27. Li R.G., Nie J.F., Huang G.J. et al. Development of high-strength magnesium alloys via combined processes of extrusion, rolling and ageing // *Scripta Materialia*. 2011. Vol. 64. Is. 10. P. 950–953.
28. Zhang Y., Rong W., Wu Y., Peng L. Achieving ultra-high strength in Mg–Gd–Ag–Zr wrought alloy via bimodal-grained structure and enhanced precipitation // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 54. P. 160–170.
29. Fan M., Cui Y., Zhang Y. et al. Achieving high strength-ductility synergy in a Mg₉₇Y₁Zn₁Ho₁ alloy via a nano-spaced long-period stacking-ordered phase // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11. Is. 4. P. 1321–1331.
30. Lukyanova E.A., Rokhlin L.L., Tabachkova N.Yu. et al. Reversion after ageing in an Mg–Y–Gd–Zr alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 635. P. 173–179.
31. Pollock T.M. Weight Loss with Magnesium Alloys // *Science*. 2010. Vol. 328 (5981). P. 986–987.
32. Proust G. Processing magnesium at room temperature // *Science*. 2019. Vol. 365 (6448). P. 30–31. DOI: 10.1126/science.aax9732.
33. Wu G., Wang C., Sun M., Ding W. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9. Is. 1. P. 1–20.
34. Gu D., Shi X., Poprawe R. et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing // *Science*. 2021. Vol. 372 (6545). P. eabg1487. DOI: 10.1126/science.abg1487.
35. Huang K., Li X., Fang X., Lu B. State-of-the-Art Progress and Outlook in Wire Arc Additive Manufacturing of Magnesium Alloys // *Acta Metallurgica Sinica*. 2025. Vol. 61. Is. 3. P. 397–419.
36. Li X., Fang X., Jiang X. et al. Additively manufactured high-performance AZ91D magnesium alloys with excellent strength and ductility via nanoparticles reinforcement // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 69. Art. 103550. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103550.
37. Li X., Fang X., Wang S. et al. Selective laser melted AZ91D magnesium alloy with superior balance of strength and ductility // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 11. Is. 12. P. 4644–4658.
38. Li K., Chen W., Yin B. et al. A comparative study on WE43 magnesium alloy fabricated by laser powder bed fusion coupled with deep cryogenic treatment: Evolution in microstructure and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103814. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103814.
39. Ling C., Li Q., Zhang Z. et al. Influence of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion behavior of WE43 alloy fabricated by laser-beam powder bed fusion // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 6 (1). Art. 015001. DOI: 10.1088/2631-7990/acfad5.
40. Jiang Y., Tang H., Li Z. et al. Additive manufactured Mg–Gd–Y–Zr alloys: Effects of Gd content on microstructure evolution and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. Part A. Art. 103136. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103136.

41. Li X., Guo J., Zhang M. et al. Uncovering the impact of Gd content on the microstructure and mechanical properties of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2025. DOI: 10.1016/j.jma.2025.04.019.
42. Li X., Fang X., Fang D. et al. On the excellent strength-ductility synergy of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy via manipulating precipitates // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103794. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103794.
43. Li X., Fang X., Zhang M. et al. Enhanced strength-ductility synergy of magnesium alloy fabricated by ultrasound assisted directed energy deposition // *Journal of Materials Science & Technology*. 2024. Vol. 178. P. 247–261.
44. Li X., Fang X., Zhang M. et al. Gradient microstructure and prominent performance of wire-arc directed energy deposited magnesium alloy via laser shock peening // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2023. Vol. 188. Art. 104029. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104029.
45. Li X., Fang X., Zhang Z. et al. Revealing precipitation behavior and mechanical response of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloy by tailoring aging procedures // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024. Vol. 6 (4). Art. 045001. DOI: 10.1088/2631-7990/ad35fd.
46. Li X., Zhang M., Fang X. et al. Improved strength-ductility synergy of directed energy deposited AZ31 magnesium alloy with cryogenic cooling mode // *Virtual and Physical Prototyping*. 2023. Vol. 18. Is. 1. Art. e2170252. DOI: 10.1080/17452759.2023.2170252.
47. Cao Q., Zeng C., Qi B. et al. Excellent isotropic mechanical properties of directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloys via establishing homogeneous equiaxed grains embedded with dispersed nano-precipitation // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 67. Art. 103498. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103498.
48. Ma D., Xu C., Sui S. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of wire arc additively manufactured Mg–Gd–Y–Zr alloy by post heat treatments // *Virtual and Physical Prototyping*. 2023. Vol. 18. Is. 1. Art. e2225492. DOI: 10.1080/17452759.2023.2225492.
49. Tong X., Wu G., Easton M.A. et al. Microstructural evolution and strengthening mechanism of Mg–Y–RE–Zr alloy fabricated by quasi-directed energy deposition // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 67. Art. 103487. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103487.
50. Ma D., Xu C., Sui S. et al. Customized heat treatment process enabled excellent mechanical properties in wire arc additively manufactured Mg–RE–Zn–Zr alloys // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024. Vol. 6 (4). Art. 045006. DOI: 10.1088/2631-7990/ad48ea.

References

1. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation technology. *75 years. Aviation materials and technologies*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Emli E.F. *Fundamentals of the Technology of Production and Processing of Magnesium Alloys*. Ed. M.E. Drits. Moscow: Metallurgiya, 1972, 488 p.
4. Kablov E.N. New Generation Materials – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Magnesium alloys for aerospace market transformation and outlook. *Market Research Intellect: An international provider of market research reports*. Available at: <http://www.marketresearchintellect.com> (accessed: February 02, 2026).
6. *Magnesium alloys: handbook in 2 parts*. Ed. M.B. Altman, M.E. Dritz, M.A. Timonova, M.V. Chukhrov. Moscow: Metallurgiya, 1978, part 1: Metallurgy of magnesium and its alloys. Application areas, 232 p.
7. Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A. Comparative studies of the structure, features of the phase composition and mechanical properties of deformed semi-finished products from VMD16 magnesium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), pp. 36–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.

8. Volkova E.F., Leonov A.A., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Alikhanyan A.A. Rare earth metals and progress in the field of deformable magnesium alloys. Review. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2025, no. 4, pp. 23–38.
9. 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), pp. 60–74. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
10. 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), pp. 13–26. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 02, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
11. Karachevtsev F.N., Eroshkin S.G., Trofimov N.V., Leonov A.A., Popovnina N.A. Development of standard samples of magnesium alloy ML19. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), pp. 26–34. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 02, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-26-34.
12. Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg–Zn–Y Alloys with 14H Long Period Ordered Structure. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, pp. 959–965.
13. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, is. 11, pp. 2986–2992.
14. Hagihara K., Yokotani N., Umakoshi Y. Plastic deformation behavior of Mg₁₂YZn with 18R long-period stacking ordered structure. *Intermetallics*, 2010, vol. 18, pp. 267–276.
15. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 6282–6293.
16. Noda M., Matsumoto R., Kawamura Y. Forging Induces Changes in the Formability and Microstructure of Extruded Mg₉₆Zn₂Y₂ Alloy with a Long-Period Stacking Order Phase. *Material Science and Engineering A*, 2013, vol. 563, pp. 21–27.
17. Hagihara K., Kinoshita A., Fukusumi Y. et al. Hightemperature compressive deformation behavior of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy containing a long period stacking ordered (LPSO) phase. *Materials Science and Engineering A*, 2013, vol. 560, pp. 71–79.
18. Yasuda N., Kimura S. Measurement of Thermal Expansion Coefficient of 18R-Synchronized Long-Period Stacking Ordered Magnesium Alloy. *Materials Transactions*, 2016, vol. 57, is. 6, pp. 1010–1013.
19. Volkova E.F., Antipov V.V., Zavodov A.V. A Study of the Fine Structure and Phase Composition of Magnesium Alloy VMD16 in Cast and Homogenized Conditions. *Metal Science and Heat Treatment*, 2019, vol. 61 (19), pp. 143–148.
20. Volkova E.F., Rokhlin L.L., Ovsyannikov B.V. *Modern wrought magnesium alloys: status and application prospects in high-tech industries*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2021, 392 p.
21. Mostyaev I.V. *Study of the influence of forging, stamping, and heat treatment process parameters on the structure, phase composition, and property level of deformed semi-finished products made of heat-resistant magnesium alloy grade VMD16*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2024, 153 p.
22. Leonov A.A. *Casting magnesium alloys of the Mg–REE–Zr system with elevated ignition temperature*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2024, 125 p.
23. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. The ways of rising of wrought magnesium alloys main mechanical characteristics. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), pp. 15–23. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
24. Wang J., Khan M.A., Dai S. et al. Effect of double-extrusion following by stepwise-hot-rolling on microstructures and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, vol. 13, is. 9, pp. 4327–4345.

25. Zhao X., Yang Z., Zhang J. et al. Formation and transformation of metastable LPSO building blocks clusters in Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloys by spinodal decomposition and heterogeneous nucleation. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, vol. 12, is. 2, pp. 673–686.
26. Liu H., Xue F., Bai J. et al. Formation Behavior of 14H Long Period Stacking Ordered Structure in Mg–Y–Zn Cast Alloys with Different α -Mg Fractions. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, vol. 32, is. 12, pp. 1267–1273.
27. Li R.G., Nie J.F., Huang G.J. et al. Development of high-strength magnesium alloys via combined processes of extrusion, rolling and ageing. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 64, is. 10, pp. 950–953.
28. Zhang Y., Rong W., Wu Y., Peng L. Achieving ultra-high strength in Mg–Gd–Ag–Zr wrought alloy via bimodal-grained structure and enhanced precipitation. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, vol. 54, pp. 160–170.
29. Fan M., Cui Y., Zhang Y. et al. Achieving high strength-ductility synergy in a Mg₉₇Y₁Zn₁Ho₁ alloy via a nano-spaced long-period stacking-ordered phase. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, vol. 11, is. 4, pp. 1321–1331.
30. Lukyanova E.A., Rokhlin L.L., Tabachkova N.Yu. et al. Reversion after ageing in an Mg–Y–Gd–Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 635, pp. 173–179.
31. Pollock T.M. Weight Loss with Magnesium Alloys. *Science*, 2010, vol. 328 (5981), pp. 986–987.
32. Proust G. Processing magnesium at room temperature. *Science*, 2019, vol. 365 (6448), pp. 30–31. DOI: 10.1126/science.aax9732.
33. Wu G., Wang C., Sun M., Ding W. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, vol. 9, is. 1, pp. 1–20.
34. Gu D., Shi X., Poprawe R. et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing. *Science*, 2021, vol. 372 (6545), pp. eabg1487. DOI: 10.1126/science.abg1487.
35. Huang K., Li X., Fang X., Lu B. State-of-the-Art Progress and Outlook in Wire Arc Additive Manufacturing of Magnesium Alloys. *Acta Metallurgica Sinica*, 2025, vol. 61, is. 3, pp. 397–419.
36. Li X., Fang X., Jiang X. et al. Additively manufactured high-performance AZ91D magnesium alloys with excellent strength and ductility via nanoparticles reinforcement. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 69, art. 103550. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103550.
37. Li X., Fang X., Wang S. et al. Selective laser melted AZ91D magnesium alloy with superior balance of strength and ductility. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 11, is. 12, pp. 4644–4658.
38. Li K., Chen W., Yin B. et al. A comparative study on WE43 magnesium alloy fabricated by laser powder bed fusion coupled with deep cryogenic treatment: Evolution in microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 77, art. 103814. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103814.
39. Ling C., Li Q., Zhang Z. et al. Influence of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion behavior of WE43 alloy fabricated by laser-beam powder bed fusion. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, vol. 6 (1), art. 015001. DOI: 10.1088/2631-7990/acfad5.
40. Jiang Y., Tang H., Li Z. et al. Additive manufactured Mg–Gd–Y–Zr alloys: Effects of Gd content on microstructure evolution and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 59, part A, art. 103136. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103136.
41. Li X., Guo J., Zhang M. et al. Uncovering the impact of Gd content on the microstructure and mechanical properties of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025. DOI: 10.1016/j.jma.2025.04.019.
42. Li X., Fang X., Fang D. et al. On the excellent strength-ductility synergy of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy via manipulating precipitates. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 77, art. 103794. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103794.
43. Li X., Fang X., Zhang M. et al. Enhanced strength-ductility synergy of magnesium alloy fabricated by ultrasound assisted directed energy deposition. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, vol. 178, pp. 247–261.
44. Li X., Fang X., Zhang M. et al. Gradient microstructure and prominent performance of wire-arc directed energy deposited magnesium alloy via laser shock peening. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, vol. 188, art. 104029. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104029.

45. Li X., Fang X., Zhang Z. et al. Revealing precipitation behavior and mechanical response of wire-arc directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloy by tailoring aging procedures. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, vol. 6 (4), art. 045001. DOI: 10.1088/2631-7990/ad35fd.
46. Li X., Zhang M., Fang X. et al. Improved strength-ductility synergy of directed energy deposited AZ31 magnesium alloy with cryogenic cooling mode. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 18, is. 1, art. e2170252. DOI: 10.1080/17452759.2023.2170252.
47. Cao Q., Zeng C., Qi B. et al. Excellent isotropic mechanical properties of directed energy deposited Mg–Gd–Y–Zr alloys via establishing homogeneous equiaxed grains embedded with dispersed nano-precipitation. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 67, art. 103498. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103498.
48. Ma D., Xu C., Sui S. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of wire arc additively manufactured Mg–Gd–Y–Zr alloy by post heat treatments. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 18, is. 1, art. e2225492. DOI: 10.1080/17452759.2023.2225492.
49. Tong X., Wu G., Easton M.A. et al. Microstructural evolution and strengthening mechanism of Mg–Y–RE–Zr alloy fabricated by quasi-directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 67, art. 103487. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103487.
50. Ma D., Xu C., Sui S. et al. Customized heat treatment process enabled excellent mechanical properties in wire arc additively manufactured Mg–RE–Zn–Zr alloys. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, vol. 6 (4), art. 045006. DOI: 10.1088/2631-7990/ad48ea.

Информация об авторах

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

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

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

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

Алиханян Арман Артакович, инженер 1 категории, 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, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

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

Статья поступила в редакцию 08.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.04.2026.
The article was submitted 08.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 13.04.2026.