

Научная статья

УДК 669.721.5: 621.762.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДНЕГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg–Zn–Zr–P3Э

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

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

Аннотация. Изложены результаты определения механических свойств, сравнительного исследования микроструктуры и фазового состава среднегабаритных поковок из жаропрочного магниевого сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э в нетермообработанном и состаренном состояниях. Установлено, что анизотропия основных механических свойств поковок не превышает 7–12,5 % в продольном, поперечном и высотном направлениях во всех изученных состояниях. Наиболее высокий уровень свойств характерен для нетермообработанного состояния в продольном направлении. Особенностью является снижение прочностных свойств при старении на 5–8 %.

Ключевые слова: деформируемый магниевый сплав, старение, механические свойства, микроструктура, фазовый состав, малая анизотропия свойств, отрицательный эффект старения

Для цитирования: 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–P3Э // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.

Scientific article

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

E.F. Volkova¹, I.V. Mostyaev¹, M.V. Akinina¹, 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 paper presents the results of determining the mechanical properties, comparative research of the microstructure and phase composition of medium-sized forgings made of heat-resistant magnesium alloy of the Mg–Zn–Zr–REE system in non-heat-treated and aged states. It was founded that the anisotropy of the main mechanical properties of forgings does not exceed 7–12,5 % in the longitudinal, transverse and altitude directions in all studied states. The highest and most stable level of properties is characteristic of the non-heat-treated state in the longitudinal direction. A special feature is the reduction of strength properties during aging by 5–8 %.

Keywords: wrought magnesium alloy, aging, mechanical properties, microstructure, phase composition, small anisotropy of properties, negative aging effect

For citation: 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. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.

Введение

Известно, что одним из основных преимуществ магниевых сплавов, повышающих их конкурентоспособность как конструкционного материала для изделий авиакосмической промышленности, служит их значительно меньшая плотность (1,73–1,85 г/см³) по сравнению с применяемыми сплавами на основе других цветных металлов. В первую очередь это следует из сравнения с плотностью конструкционных сплавов на основе алюминия (2,73–2,84 г/см³) и титана (4,32–4,60 г/см³).

Следует также отметить, что деформируемые магниевые сплавы, относящиеся к группе высокопрочных и жаропрочных сплавов, являются практически единственной альтернативой в ряду металлических материалов по отношению к конструкционным полимерным композиционным материалам не только по своим весовым характеристикам, но и по целому ряду других существенных преимуществ – хорошей технологичности, высокой демпфирующей способности, благоприятному уровню характеристик выносливости и т. д. [1–3].

Для успешного внедрения магниевых деформируемых сплавов в конструкции современных летательных аппаратов необходимо изыскивать новые композиции сплавов, осваивать применительно к ним современные технологии. Это позволит улучшить технологические и эксплуатационные характеристики материалов, что, в свою очередь, даст возможность расширить области их применения [4, 5].

Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ жаропрочный и высокопрочный деформируемый сплав системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ предназначен для получения прессованных, кованных и штампованных полуфабрикатов широкой номенклатуры. Проведенные ранее исследования показали, что этот сплав обладает способностью к образованию твердых растворов с упорядоченной структурой дальнего порядка – длиннопериодных фаз (long-period stacking ordered phases – LPSO-фазы) [6]. Сплавы этой группы представляют особый интерес для практического применения благодаря повышенному уровню механических, коррозионных и технологических характеристик, что установлено как зарубежными, так и отечественными исследователями [7–11]. LPSO-магниевые сплавы системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ отличаются сложным фазовым составом [6, 12–15] и рассматриваются в качестве наиболее перспективных легких конструкционных материалов.

Практический и научный интерес представляет дальнейшее исследование возможностей повышения уровня основных эксплуатационных характеристик сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ за счет процесса деформации, а также возможных структурных и фазовых изменений в сплаве путем применения термической обработки на заключительном этапе производства изделия [16–18].

Для получения деформируемого сплава с необходимыми механическими свойствами важно понимать механизмы, определяющие не только процесс течения металла, но также и деформационное упрочнение поликристаллов. Поэтому особое внимание за рубежом и в нашей стране уделяется изучению процессов деформации LPSO-магниевых сплавов, их поведения при различных температурах и возможных условий эксплуатации.

При равномерной деформации поликристаллов для минимизации возможности разрушения по границам зерен должны быть задействованы не менее пяти независимых систем скольжения.

Известно, что магниевые и высокопрочные сплавы на его основе обладают гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой, которая не может обеспечить существование таких систем скольжения. Поэтому необходимо дополнительно подключить механизм двойникования с тем, чтобы привлечь другие неосновные системы скольжения, либо подключить деформацию путем двойникования. Ограниченное количество систем скольжения приводит, как правило, к проявлению низкотемпературной хрупкости сплава. Важное значение в деформационном поведении магниевых высокопрочных и жаропрочных сплавов имеют системы призматического скольжения первого порядка и системы пирамидального скольжения второго порядка, а также правильно подобранные температурно-скоростные параметры деформации [14].

В связи с вышеизложенным для улучшения качества полуфабрикатов и изделий из деформируемых магниевых сплавов на практике на первом этапе производства деталей часто используют предварительно деформированные (чаще всего прессованные) заготовки.

Известно, что для изготовления деформированного полуфабриката большое значение приобретает процесс структурообразования [15, 19]. На структуро- и формообразование сплава в первую очередь оказывают влияние три основных фактора: температура, степень и скорость деформации. Кроме того, существенное значение также приобретают степень напряженного состояния, химический и фазовый составы самого сплава. Для большинства металлических сплавов (в частности, для магниевых сплавов с кристаллической ГПУ-решеткой) существенным недостатком прессованных полуфабрикатов является анизотропия свойств и структуры. Для изменения ориентировки зерен в структуре предварительно прессованной заготовки и снижения выраженной анизотропии свойств используют осадку обточенных и нарезанных мерных цилиндрических заготовок до получения диска определенных высоты и диаметра. Следует отметить, что прессованные заготовки перед использованием их для последующейковки обтачивают с целью исключения любых поверхностных дефектов.

В отдельных случаях изготовление изделий из магниевых деформируемых сплавов из ковальной заготовки может быть предпочтительней, чем из прессованной заготовки или штамповки. При изготовлении поковок можно подобрать такую схему деформации, которая позволит максимально снизить анизотропию свойств, являющуюся, как указано ранее, одним из главных недостатков магниевых сплавов. В процессековки (по возможности) следует избегать промежуточных нагревов; в случае необходимости следует нагревать заготовки до невысоких температур, чтобы избежать рекристаллизации и роста зерна. Необходимо строго выдерживать температурный интервал нагрева штампов (для высокопрочных магниевых сплавов, как правило, до 330–380 °С), так как недостаточный нагрев инструмента затруднит деформацию и вызовет образование трещин [15].

Ковка магниевых деформируемых сплавов позволяет получать высокие свойства с достаточно низким уровнем анизотропии. Механические свойства и степень изотропности поковок во многом зависят от схемыковки. Данный процесс для магниевых сплавов недостаточно изучен и требует проведения дополнительных экспериментов.

Из широкого спектра деформированных полуфабрикатов, производимых из сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э, впервые для всестороннего исследования выбраны поковки массой 22 кг, поскольку они имеют большое практическое значение как промежуточный деформированный полуфабрикат для последующего непосредственного изготовления конкретных деталей.

Цель данной работы – исследование закономерностей влияния термической обработки (старения) на структуру, фазовый состав и механические свойства среднегабитных поковок из жаропрочного магниевосплав системы Mg–Zn–Zr–P3Э.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [20].

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили поковки массой 22 кг из сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э. Предварительно слитки из сплава размером $\varnothing 360 \times 500$ мм отлили в промышленных условиях металлургического завода с применением защитной атмосферы.

Гомогенизационный отжиг слитков проводили в печах с электрическим обогревом в воздушной атмосфере с добавлением от 0,5 до 1,0 % сернистого газа. Обточку слитков осуществили на токарно-винторезном станке. Обрезку слитков на мерные заготовки произвели на ленточно-отрезном станке.

После гомогенизации заготовки из слитков подвергли горячему прессованию на прутки $\varnothing 190$ мм в промышленных условиях металлургического завода на горизонтальном гидравлическом прессе. Известно, что в процессе горячего прессования используется схема напряженного состояния, гарантирующая минимальное появление в металле значительных растягивающих напряжений, что особенно благоприятно для высокопрочных магниевых сплавов [21].

Исходными заготовками для последующейковки послужили промежуточные прессованные мерные заготовки размером $\varnothing 190 \times 400$ мм. Изготовление среднегабаритных поволоков массой 22 кг провели в промышленных условиях металлургического завода на ковочном прессе усилием 5000 тонн.

Термическую обработку образцов, вырезанных из поволоков массой 22 кг сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э, осуществили в камерной высокотемпературной печи с принудительной циркуляцией воздуха с использованием сернистого газа по установленным режимам.

Исследование микроструктуры шлифов проводили на металлографическом комплексе при увеличениях $\times 100$ и $\times 1000$. Для съемки изображений применяли цифровую камеру (3 мегапикселя). Обработку изображений и их подготовку к количественному анализу, а также математическую обработку результатов выполняли при помощи компьютерной программы.

Более подробно микроструктуру и фазовые составляющие в структуре поковки из сплава исследовали на растровом электронном микроскопе с установкой для микро-рентгеноспектрального анализа (МРСА). Фотографии выполняли в режиме композиционного контраста, который определяется средним атомным номером области (фазы).

Определение локального элементного состава интерметаллидных фаз и основного α -твердого раствора в образцах проведено на растровом электронном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 0,5 нА.

Это определение проведено в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015 (локальность анализа 1 мкм^2 , глубина анализа 1 мкм) с применением калибровки по сертифицированным эталонам. Диапазон регистрируемых элементов для качественного анализа – от Be (атомный номер $Z = 4$) до U ($Z = 92$), для количественного анализа – от Na (атомный номер $Z = 11$) до U ($Z = 92$).

Фотографии микроструктуры выполнены в режиме СОМРО, изображение в котором формируется обратноотраженными электронами. Контраст изображения в режиме СОМРО определяется средним атомным номером исследуемой области (фазы). Чем

больше средний атомный номер исследуемой области, тем светлее данный участок выглядит на фотографии, что позволяет определить по композиционному контрасту фазы, присутствующие в сплаве.

Механические свойства при растяжении определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Результаты и обсуждение

Механические свойства поковки массой 22 кг изучали в исходном (нетермообработанном) состоянии и после различных режимов старения в трех направлениях: продольном, поперечном и высотном. Режимы старения подбирали в соответствии с результатами предварительных исследований, проведенных авторами данной статьи, а также принимая во внимание материалы, опубликованные в работах [7, 14]. Полученные свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний* на растяжение образцов из сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ при температуре 20 °С (поковка массой 22 кг)

Направление вырезки образцов	Режим старения	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Продольное	В исходном состоянии (без термообработки)	<u>325–330</u> 330	<u>260–275</u> 270	<u>12–14</u> 13
	При 180 °С в течение 24 ч	310	<u>245–255</u> 250	<u>12–16</u> 14
	При 180 °С в течение 48 ч	<u>315–320</u> 315	<u>245–255</u> 250	<u>10–16</u> 14
	При 180 °С в течение 96 ч	<u>315–320</u> 320	<u>245–255</u> 250	<u>12–16</u> 14
	При 200 °С в течение 24 ч	310	<u>250–255</u> 250	<u>12–13</u> 13
	При 200 °С в течение 48 ч	<u>300–305</u> 305	245	<u>14–16</u> 15
	При 200 °С в течение 96 ч	<u>315–320</u> 320	<u>270–275</u> 270	<u>11–13</u> 12
	При 220 °С в течение 24 ч	310	250	<u>10–13</u> 12
	При 220 °С в течение 48 ч	315	<u>260–265</u> 265	<u>12–16</u> 14
	При 220 °С в течение 96 ч	<u>310–315</u> 315	<u>245–260</u> 255	<u>10–14</u> 13
Высотное	В исходном состоянии (без термообработки)	<u>285–300</u> 295	<u>250–255</u> 250	<u>15–17</u> 16
	При 200 °С в течение 48 ч	<u>275–285</u> 280	250	<u>14–16</u> 15
Поперечное	В исходном состоянии (без термообработки)	<u>300–310</u> 305	<u>245–260</u> 255	<u>12–13</u> 12
	При 200 °С в течение 48 ч	<u>305–315</u> 310	<u>240–260</u> 250	<u>14–16</u> 15

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее значение по результатам испытания 5–7 образцов.

Видно, что наилучшее сочетание усредненных значений прочностных свойств ($\sigma_B = 330$ МПа, $\sigma_{0,2} = 270$ МПа) и характеристики пластичности ($\delta \geq 13$ %)

наблюдается в нетермообработанном состоянии. Ни один из использованных режимов старения не дал эффекта заметного повышения свойств. Следует отметить, что анизотропия значений механических характеристик поковки составляет не более 7–12,5 % в продольном, поперечном и высотном направлениях. Как и для большинства легких сплавов, высотное направление характеризуется более низким уровнем свойств. В состаренном состоянии уровень прочностных свойств незначительно снижается (на 5–12 %) в продольном направлении и остается практически на том же уровне, что и для нетермообработанного состояния в поперечном направлении. Величина относительного удлинения несколько возрастает (на 2–4 единицы) в состаренном состоянии. Очевидно, это можно объяснить тем, что после старения за счет длительных температурных воздействий происходит снятие внутренних напряжений. В то же время жаропрочная природа сплава, отсутствие фазовых превращений при температурах старения (как установлено ранее по результатам исследования методом динамического термического анализа) обеспечивают высокую термостабильность фаз.

Интерес могут представлять некоторые режимы старения:

в продольном направлении

- при 180 °С в течение 96 ч;
- при 200 °С в течение 96 ч;
- при 220 °С в течение 48 ч;

в поперечном направлении

- при 200 °С в течение 48 ч.

В высотном направлении поковок в состаренном состоянии отмечен небольшой отрицательный эффект по значениям предела прочности в 4–5 % (табл. 1). В связи с этим исследованы особенности микроструктуры и фазового состава образцов поковки из сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э в состаренном состоянии в сравнении с нетермообработанным состоянием.

Первоначально микроструктура образцов исследована на металлографическом комплексе в продольном направлении (рис. 1). В деформированном состоянии без термообработки (рис. 1, а) поковки сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э характеризуются структурой с вытянутыми деформированными зёрнами. В теле основных зёрен формируются полигонизованные субзёрна. По границам основных деформированных зёрен располагается эвтектика, которая состоит из крупных образований, прерывисто декорирующих границы зёрен. При большом увеличении заметным становится сложный характер эвтектических составляющих, которые представляют собой как бы многослойные неоднородные выделения.

После проведения старения (рис. 1, в, г) при визуальном наблюдении объёмная доля эвтектических составляющих практически не меняется. Однако можно видеть появление более выраженной сетки вторично выделяющихся интерметаллидных фаз в объёме зёрен. Формирующаяся сетка тонко очерчивает границы субзёрен, образовавшихся в теле основного зёрна. Это можно объяснить тем, что при проведении нагрева при достаточно длительном старении диффузионные процессы в сплаве активизируются, в значительной степени происходит снятие внутренних напряжений, возможно также частичное развитие начальной стадии рекристаллизации.

Основной особенностью микроструктуры поковки из сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э является то, что размеры сформированных субзёрен (независимо от режима термообработки) в достаточной мере близки между собой. Различия в значениях составляют не более 10–16 %, что может свидетельствовать об отличительных свойствах фазового состава и структуры сплава, оптимально подобранных температурно-

временных параметрах деформации и еще раз подтверждает высокую термостабильность фаз.

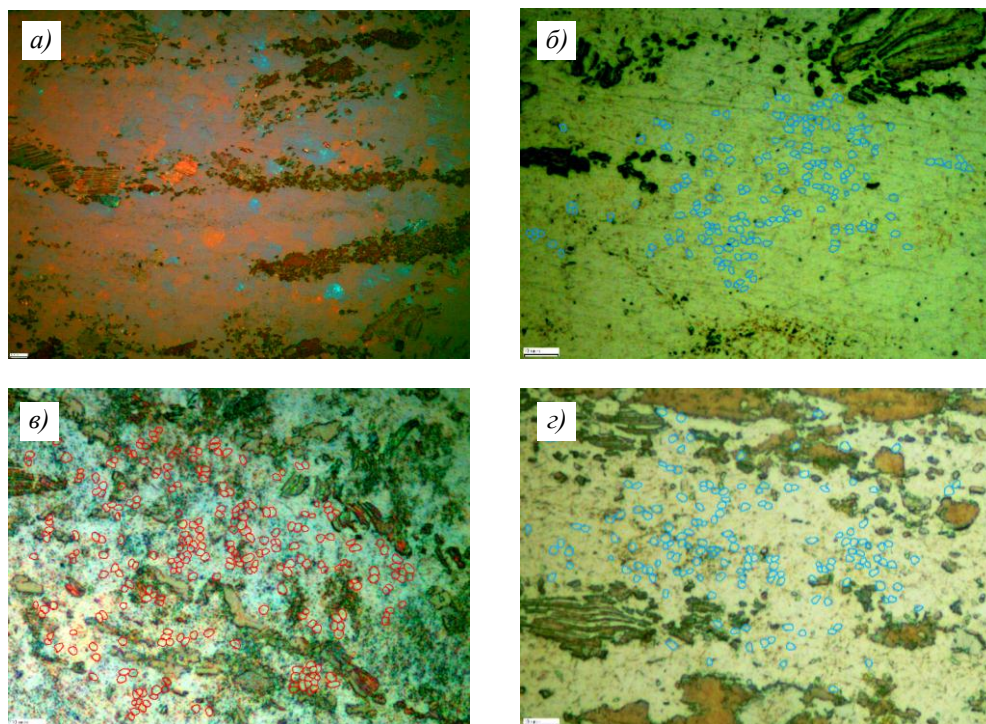


Рис. 1. Микроструктура (*a* – $\times 500$; с контурной прорисовкой зерен субструктуры *b–z* – $\times 1000$) образцов из поковки массой 22 кг (продольное направление) в исходном нетермообработанном состоянии (*a* – в поляризованном свете; *b*) и после старения по режимам: при 200 °С в течение 96 ч (*v*) и при 220 °С в течение 48 ч (*z*). Оптический микроскоп

Результаты определения геометрических параметров субзерен образцов в продольном направлении для некоторых режимов старения приведены в табл. 2. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что субзеренная структура всех образцов из поковки практически равноосная, размерный параметр субзерен приблизительно одинаков для всех исследованных состояний сплава и составляет около $1,9\pm 0,3$ мкм (табл. 2).

Таблица 2

Геометрические параметры субзерен в образцах из поволок массой 22 кг при исследовании в продольном направлении

Режим старения образца	Средний диаметр, мкм	Диаметр окружности эквивалентной площади, мкм	Вытянутость	Средний диаметр Фере, мкм	
				максимальный	минимальный
В исходном состоянии (без термообработки)	1,698	1,551	1,45	2,001	1,396
При 200 °С в течение 96 ч	2,008	1,845	1,40	2,324	1,691
При 220 °С в течение 48 ч	1,915	1,768	1,43	2,237	1,593

Величина диаметра Фере обычно характеризует длину проекции изображения микрообъекта (зерна) на прямую в заданном направлении, измеряемой как расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно выбранному направлению работ. Исходя из величины этой характеристики можно утверждать, что незначительные различия в значениях среднего минимального и среднего максимального диаметров Фере, а также учитывая практически мало меняющуюся характеристику вытянутости зерен, можно считать, что зерна сохраняют форму, близкую к округлой, в процессе проведения термической обработки.

Следует отметить, что для исследованных состояний поковки наряду с формированием субзеренной структуры характерна ее малая разнотернистость.

Более подробная информация о фазовом составе материала поволоков получена по результатам изучения образцов на растровом микроскопе (рис. 2–4).

При исследовании на растровом микроскопе микроструктура образцов, вырезанных из поковки в продольном направлении, представляет собой вытянутые вдоль оси деформации зерна твердого раствора и строчки эвтектических интерметаллидных фаз (рис. 2, *a*). При визуальном сравнении характера структуры поковки в продольном и поперечном направлениях, как в нетермообработанном состоянии, так и после проведенного старения, вытянутость интерметаллидных фаз в поперечном направлении незначительна (рис. 2). Это логически можно объяснить сложной схемойковки, способствующей более равномерному распределению волокна в процессе деформации и, как следствие, приводящей к выравниванию механических свойств в объеме всей поковки. Наряду с формированием равноосной нанодисперсной субзеренной структуры эта особенность в значительной степени объясняет малую анизотропию механических свойств исследуемых поволоков.

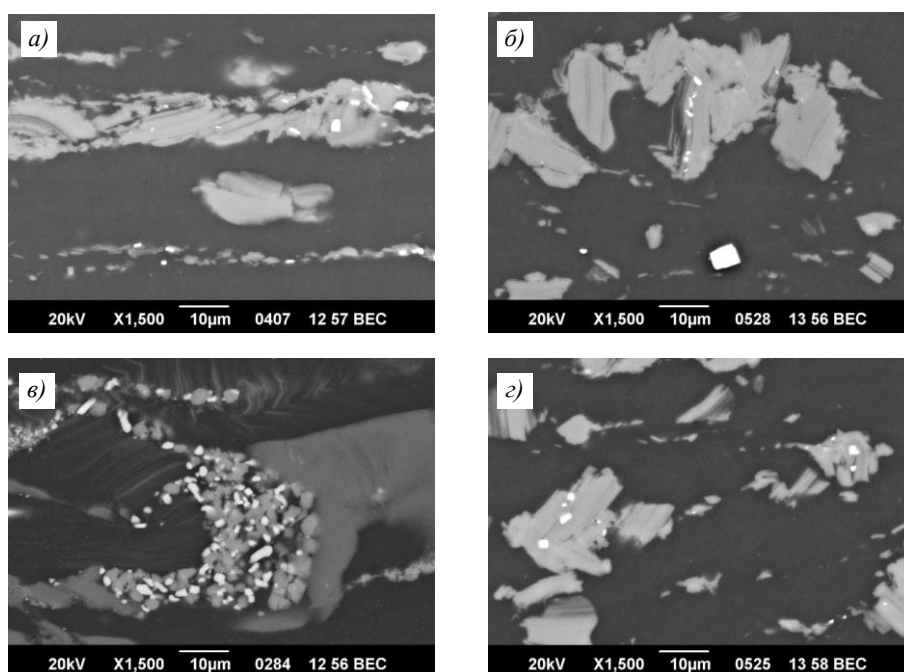


Рис. 2. Микроструктура поковки массой 22 кг в исходном нетермообработанном состоянии (*a*, *b*) и после старения по режиму при 200 °С в течение 96 ч (*в*, *г*) при исследовании образцов в продольном (*a*, *в*) и поперечном (*б*, *г*) направлениях

Проведен также МРСА основного α -твердого раствора, эвтектических интерметаллидных фаз, а также более мелких интерметаллидных фаз в продольном

направлении в нетермообработанном (рис. 3) и состаренном состояниях при 200 °С в течение 96 ч (рис. 4).

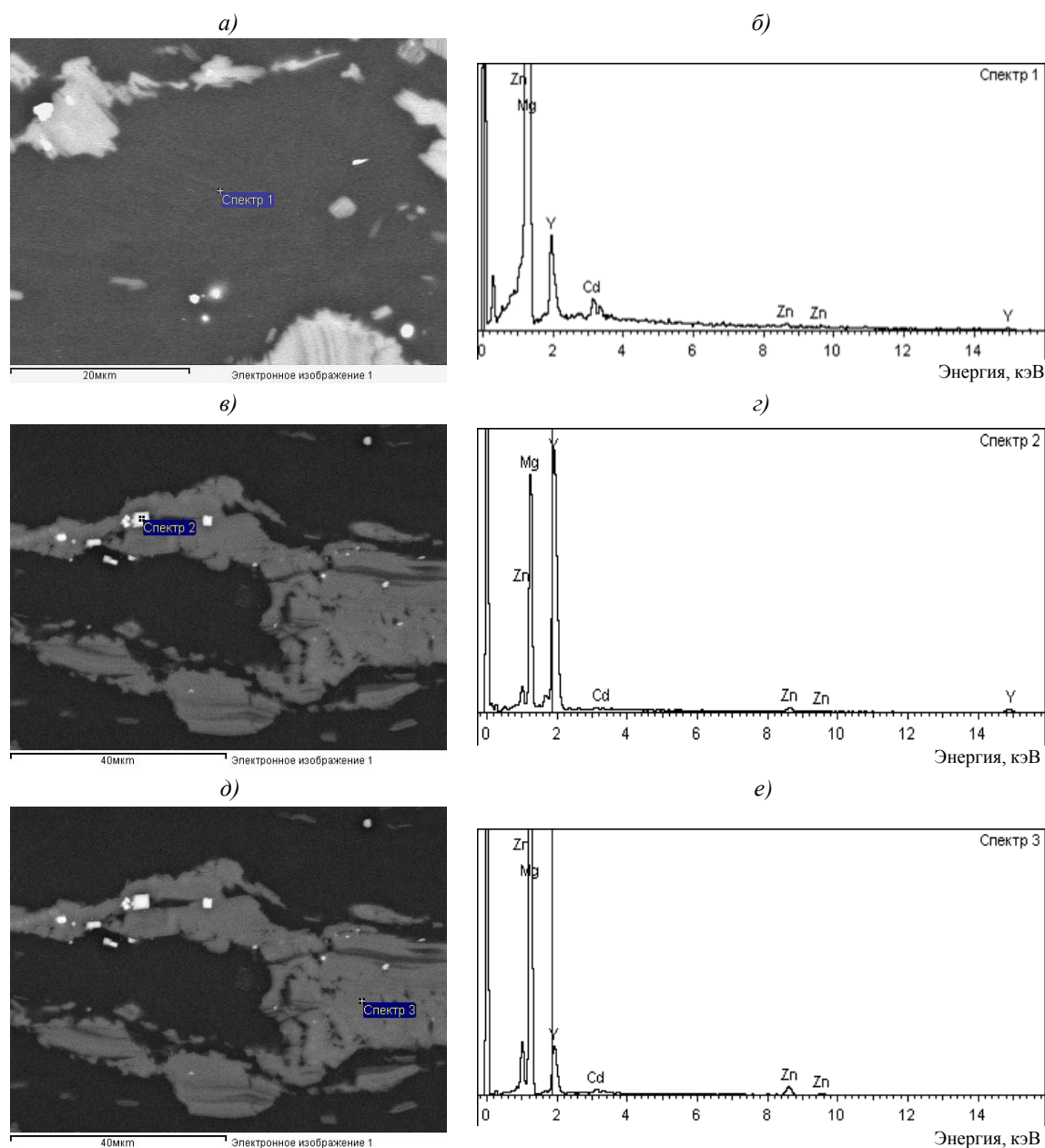


Рис. 3. Микроструктура образцов из поковки массой 22 кг, исследованной в продольном направлении в исходном нетермообработанном состоянии: *a* – основной α -твердый раствор; *в* – светлое включение на теле интерметаллидной фазы; *д* – сложная интерметаллидная фаза эвтектического происхождения; *б*, *г*, *е* – результаты распределения элементов согласно МРСА соответствующих областей. Растровый микроскоп

Результаты МРСА фаз сплава в нетермообработанном состоянии свидетельствуют о том, что в α -твердом растворе на основе магния преобладают основные легирующие элементы: цинк и иттрий, а в малых количествах – кадмий (рис. 3, *а*, *б*). В спектре эвтектической интерметаллидной фазы серого оттенка (рис. 3, *в*, *г*) отмечается высокое содержание иттрия и цинка на фоне магния. В другой зоне этой исследуемой интерметаллидной фазы можно констатировать более высокое содержание

циркония (рис. 3, *д, е*). Таким образом, эти крупные интерметаллидные фазы эвтектического происхождения многослойны и неоднородны по составу.

Дальнейшие исследования на растровом микроскопе структуры и фазового состава поковок в состаренном состоянии подтверждают, что старение не вносит особо заметных изменений в микроструктуру сплава. Данные по МРСА α -твердого раствора на основе магния (рис. 4, *а, б*) практически идентичны результатам, полученным для нетермообработанного состояния (рис. 3, *а, б*). Спектр эвтектической интерметаллидной фазы серого оттенка (рис. 4, *в, з*) указывает на наличие цинка и иттрия, а также неодима в твердом растворе на основе магния. На рис. 3, *в* (нетермообработанное состояние) видны скопления нанодисперсных частиц интерметаллидов. Наличие подобных частиц характерно также для состаренного состояния (рис. 4, *д*). Результаты МРСА подтверждают, что в их составе присутствуют такие элементы, как неодим, лантан, цирконий, иттрий и магний (рис. 4, *е*).

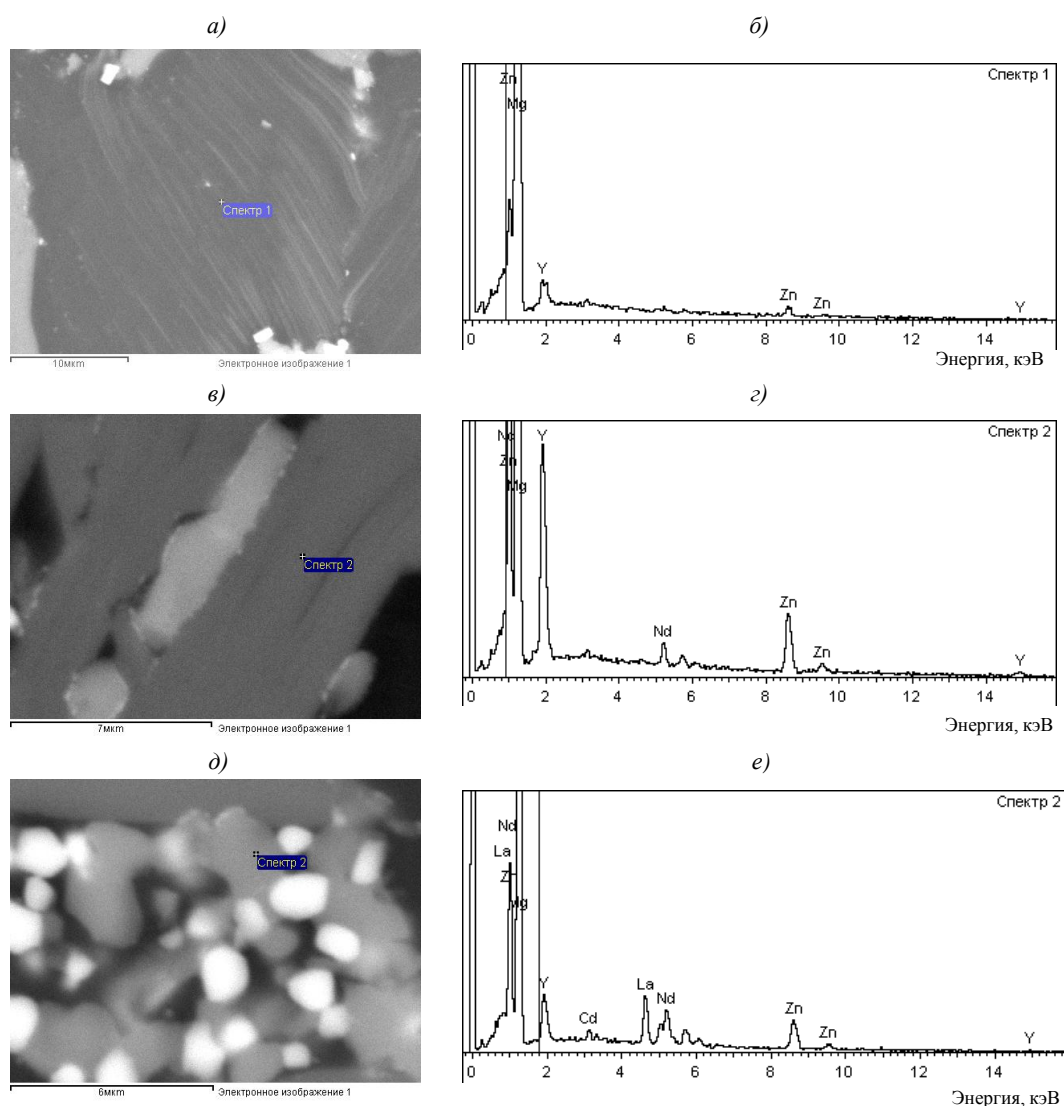


Рис. 4. Микроструктура образцов из поковки массой 22 кг, исследованной в продольном направлении в состоянии после старения при 200 °С в течение 96 ч: *а* – основной α -твердый раствор; *в* – пластинчатая интерметаллидная сложная фаза эвтектического происхождения; *д* – скопление наноразмерных интерметаллидов сложного состава; *б, з, е* – результаты распределения элементов согласно МРСА соответствующих областей. Растровый микроскоп

Таким образом, даже длительное старение при 200 °С в течение 96 ч не вносит заметных изменений в фазовый состав поковки из сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ, но может вызывать некоторое перераспределение элементов в составе интерметаллидных фаз.

Заключения

Анализ полученных результатов проведенного исследования закономерностей влияния термической обработки (старения) на структуру, фазовый состав и механические свойства среднегабаритных поковок из жаропрочного магниевого сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ позволяет сделать следующие выводы.

Общий уровень механических свойств поковок в нетермообработанном состоянии в продольном направлении стабилен и достаточно высок: $\sigma_b = 330$ МПа, $\sigma_{0,2} = 270$ МПа, $\delta \geq 13$ %.

Анизотропия значений основных механических характеристик поковок составляет не более 7–12,5 % в продольном, поперечном и высотном направлениях во всех изученных состояниях, что объясняется спецификой структурно-фазовых особенностей самого сплава, разработанной схемой деформации, способствующей более равномерному распределению волокна в объеме поковки, и формированием равноосной нанодисперсной субзеренной структуры.

Проведение старения нецелесообразно, так как характеризуется проявлением определенного отрицательного эффекта: на 5–8 % снижаются значения прочностных свойств поковок во всех исследованных направлениях при некотором повышении относительного удлинения. Это объясняется снятием внутренних напряжений в процессе нагрева при старении, отсутствием фазовых превращений в температурном интервале старения, высокой термостабильностью упрочняющих интерметаллидных фаз.

Список источников

1. Николас А., Рыльник С. Применение магневых компонентов в аэрокосмической индустрии // Аэрокосмический курьер. 2011. № 1. С. 42–44.
2. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое оксидирование магневых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
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. Agnew S.R. Wrought magnesium: A 21st century outlook // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2004. Vol. 56 (5). P. 20–21.
6. 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). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.
7. 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). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.

8. Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide // *Journal of Magnesium Alloys*. 2020. Vol. 8. P. 1–41.
9. Hagihara K., Yokotani N., Umakoshi Y. Plastic deformation behavior of Mg₁₂YZn with 18R long-period stacking ordered structure // *Intermetallics*. 2010. Vol. 18. P. 267–276.
10. Gao J.J., Fu J., Zhang N., Chen Y.A. Structural features and mechanical properties of Mg–Y–Zn–Sn alloys with varied LPSO phases // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 768. P. 1029–1038.
11. Negishi Y., Nishimura T., Iwasawa S. et al. Aging and tensile properties of Mg–Gd–Nd–Zr and Mg–Dy–Nd–Zr alloys // *Journal of Japan Institute of Light Metals*. 1994. Vol. 44 (10). P. 555–561.
12. Hagihara K., Okamoto T., Yamasaki M. et al. Electron backscatter diffraction pattern analysis of the deformation band formed in the Mg-based long-period stacking ordered phase // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 32–36.
13. Yamasaki M., Hagihara K., Inoue S. et al. Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg–Zn–Y alloy using intragranular misorientation axis analysis // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 2065–2076.
14. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure // *Materials Transactions*. 2007. Vol. 48 (11). P. 2986–2992.
15. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Овсянников Б.В. Современные деформируемые магниевые сплавы: состояние и перспективы применения в высокотехнологичных отраслях промышленности: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2021. 392 с.
16. Zheng K.Y., Dong J., Zeng X.Q., Ding W.J. Effect of precipitation aging on the fracture behavior of Mg–11Gd–2Nd–0.4Zr cast alloy // *Materials Science and Engineering*. 2008. Vol. 489 (1–2). P. 44–54.
17. Wang H.Y., Rong J., Yu Z.Y. et al. Tensile properties, texture evolutions and deformation anisotropy of asextruded Mg–6Zn–1Zr magnesium alloy at room and elevated temperatures // *Materials Science and Engineering. A*. 2017. Vol. 697. Article 149e157.
18. 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.
19. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Многоуровневое масштабное комплексное исследование деформирования металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
20. 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.
21. Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Пройдакова Л.А. Свойства горячепрессованного профиля из магниевых сплавов МА14, полученного в производственных условиях // *Сфера глубокой переработки алюминия*. 2023. № 2. С. 28–31.

References

1. Nicholas A., Rylnik S. Application of magnesium components in the aerospace industry. *Aerokosmicheskiy kuryer*, 2011, no. 1, pp. 42–44.
2. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
3. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation technology. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.

4. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Agnew S.R. Wrought magnesium: A 21st century outlook. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2004, vol. 56 (5), pp. 20–21.
6. 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), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.
7. 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: September 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
8. Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium Alloys*, 2020, vol. 8, pp. 1–41.
9. 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.
10. Gao J.J., Fu J., Zhang N., Chen Y.A. Structural features and mechanical properties of Mg–Y–Zn–Sn alloys with varied LPSO phases. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 768, pp. 1029–1038.
11. Negishi Y., Nishimura T., Iwasawa S. et al. Aging and tensile properties of Mg–Gd–Nd–Zr and Mg–Dy–Nd–Zr alloys. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1994, vol. 44 (10), pp. 555–561.
12. Hagihara K., Okamoto T., Yamasaki M. et al. Electron backscatter diffraction pattern analysis of the deformation band formed in the Mg-based long-period stacking ordered phase. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 32–36.
13. Yamasaki M., Hagihara K., Inoue S. et al. Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg–Zn–Y alloy using intragranular misorientation axis analysis. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 2065–2076.
14. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48 (11), pp. 2986–2992.
15. Volkova E.F., Rokhlin L.L., Ovsyannikov B.V. *Modern deformable magnesium alloys: state and prospects for use in high-tech industries: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2021, 392 p.
16. Zheng K.Y., Dong J., Zeng X.Q., Ding W.J. Effect of precipitation aging on the fracture behavior of Mg–11Gd–2Nd–0.4Zr cast alloy. *Materials Science and Engineering*, 2008, vol. 489 (1–2), pp. 44–54.
17. Wang H.Y., Rong J., Yu Z.Y. et al. Tensile properties, texture evolutions and deformation anisotropy of asextruded Mg–6Zn–1Zr magnesium alloy at room and elevated temperatures. *Materials Science and Engineering. A*, 2017, vol. 697, article 149e157.
18. 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.
19. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Multilevel large-scale complex research of deformation of metal materials. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.

20. 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.
21. Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Proydakova L.A. Properties of a hot-pressed profile made of MA14 magnesium alloy, obtained under production conditions. *Sfera glubokoy pererabotki alyuminiya*, 2023, no. 2, pp. 28–31.

Информация об авторах

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

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

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

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

Information about the authors

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

Igor V. Mostyaev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.11.2023.
The article was submitted 28.11.2023; approved and accepted for publication after reviewing 30.11.2023.