

Научная статья

УДК 669.721: 621.762.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

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

Аннотация. Представлен обзор наиболее значимых публикаций, посвященных проблеме разработки новых технологических процессов при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов. Установлено, что наряду с изысканием экономнолегированных композиций составов активно разрабатываются перспективные технологические процессы производства полуфабрикатов. Это сопровождается поиском оригинальных инженерных решений при конструировании и использовании соответствующего нестандартного оборудования.

Ключевые слова: деформируемые магниевые сплавы, новые технологические процессы, гнутый профиль, высокоскоростная прокатка, дисперсные интерметаллидные фазы, стойкость к воспламенению

Для цитирования: Волкова Е.Ф., Алиханян А.А., Акинина М.В., Мостяев И.В. Новые технологические процессы при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56.

Scientific article

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM MAGNESIUM ALLOYS

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

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 overview of the most significant publications devoted to the problem of developing new technological processes in the production of high-quality semi-finished products from magnesium alloys. It has been determined that along with the search for sparingly alloyed compositions there is an active exploration of promising technological processes for the production of semi-finished products from magnesium alloys. These actions are accompanied by the search for original engineering solutions in the design and use of appropriate non-standard equipment.

Keywords: wrought magnesium alloys, new technological processes, bent profile, high-speed rolling, dispersed intermetallic phases, resistance to ignition

For citation: Volkova E.F., Alikhanyan A.A., Akinina M.V., Mostyaev I.V. New technological processes in the production of high-quality semi-finished products from magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56.

Введение

Магниевые сплавы – наиболее легкие, в большинстве случаев экологически чистые конструкционные материалы. Они обладают большим потенциалом применения в изделиях оборонной, авиационной, транспортной, медицинской и электронной промышленности.

Как показывают результаты анализа зарубежных научно-технических публикаций по данной проблематике, интерес к магниевым сплавам в XXI в. возрастает [1–5]. Положительные перспективы применения магниевых сплавов в современных отраслях техники, в частности в авиационной, космической и оборонной промышленности, отмечаются и отечественными исследователями. Материалы для космических аппаратов должны выдерживать специфически экстремальные условия эксплуатации в космическом пространстве, а также обеспечивать стабильную работу аппарата в космосе. Основные требования к этим материалам – высокая удельная прочность и жесткость, хорошие показатели стабильности размеров [6, 7].

Для деталей, применяемых в конструкции самолетов, требуются стабильные и повышенные удельные характеристики прочности и жесткости. Материалы должны выдерживать статические и переменные нагрузки, возникающие под воздействием различных факторов, таких как взлет и посадка, маневренный полет и резкие изменения скоростного режима. Поэтому такая характеристика, как сопротивление усталости, имеет большое значение для авиационных материалов. Использование магниевых сплавов позволяет снизить расход топлива, увеличить дальность и продолжительность полета [4, 7–9].

Благодаря особым техническим характеристикам магниевые сплавы применяются в наиболее перспективной области современных электронных коммуникаций: в электронных компонентах фотокамер, телевизоров, ноутбуков, плазменных дисплеев, мобильных телефонов и др. В автомобильной промышленности магниевые сплавы широко используются при производстве серии деталей: корпусов коробки передач, приборных панелей, капотов двигателей, рам, дверей и др. [8, 9].

Хорошая биосовместимость с тканями человеческого организма и физическая стабильность изделий из магниевых сплавов в процессе эксплуатации делают их пригодными для использования в качестве медицинских имплантатов [10–13].

Широкие исследования магниевых сплавов и разработка новых технологических процессов их производства проводятся учеными и инженерами из КНР, США, Южной Кореи, Австралии, Японии и др.

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

Результаты анализа и обсуждение публикаций

Закономерно, что технологические процессы при производстве деталей из магниевых сплавов разрабатываются в зависимости от конкретного изделия, для которого они предназначаются. В первую очередь во внимание принимаются условия эксплуатации деталей. Новые сложные технологические процессы, как правило, первоначально применяют к известным и хорошо изученным недорогим серийным сплавам.

Так, изогнутые профили сложной конфигурации из деформируемого магниевого сплава AZ31 могут найти достаточно широкое применение в деталях конструкций транспортных средств (автомобили, железнодорожные поезда, самолеты), где весовой фактор имеет решающее значение. Обычно изогнутые профили изготавливаются из прессованных полуфабрикатов с помощью операции гибки.

Поскольку магниевые сплавы обладают гексагональной плотноупакованной структурой, они характеризуются ограниченной пластичностью и формуемостью при комнатной температуре. Для проведения пластической деформации магниевых сплавов необходим нагрев заготовок и инструмента до температур не ниже 200–225 °С [9, 14, 15]. При этом используемая в настоящее время операция гибки после прессования может включать несколько технологических этапов: гибку прессом/поршневым прессом, гибку с вращательным вытягиванием и гибку с тремя валками [16–20].

Авторы работы [14] предложили оригинальную технологию изготовления изогнутых профилей из сплава AZ31 за одну операцию с помощью нового процесса поперечной экструзии с дифференциальной скоростью (differential velocity sideways extrusion – DVSE). Использован гидравлический пресс, в котором сконструированы два перпендикулярных по отношению друг к другу контейнера (рис. 1). Такой пресс создает различную величину усилия сжатия по двум направлениям (рис. 1, а).

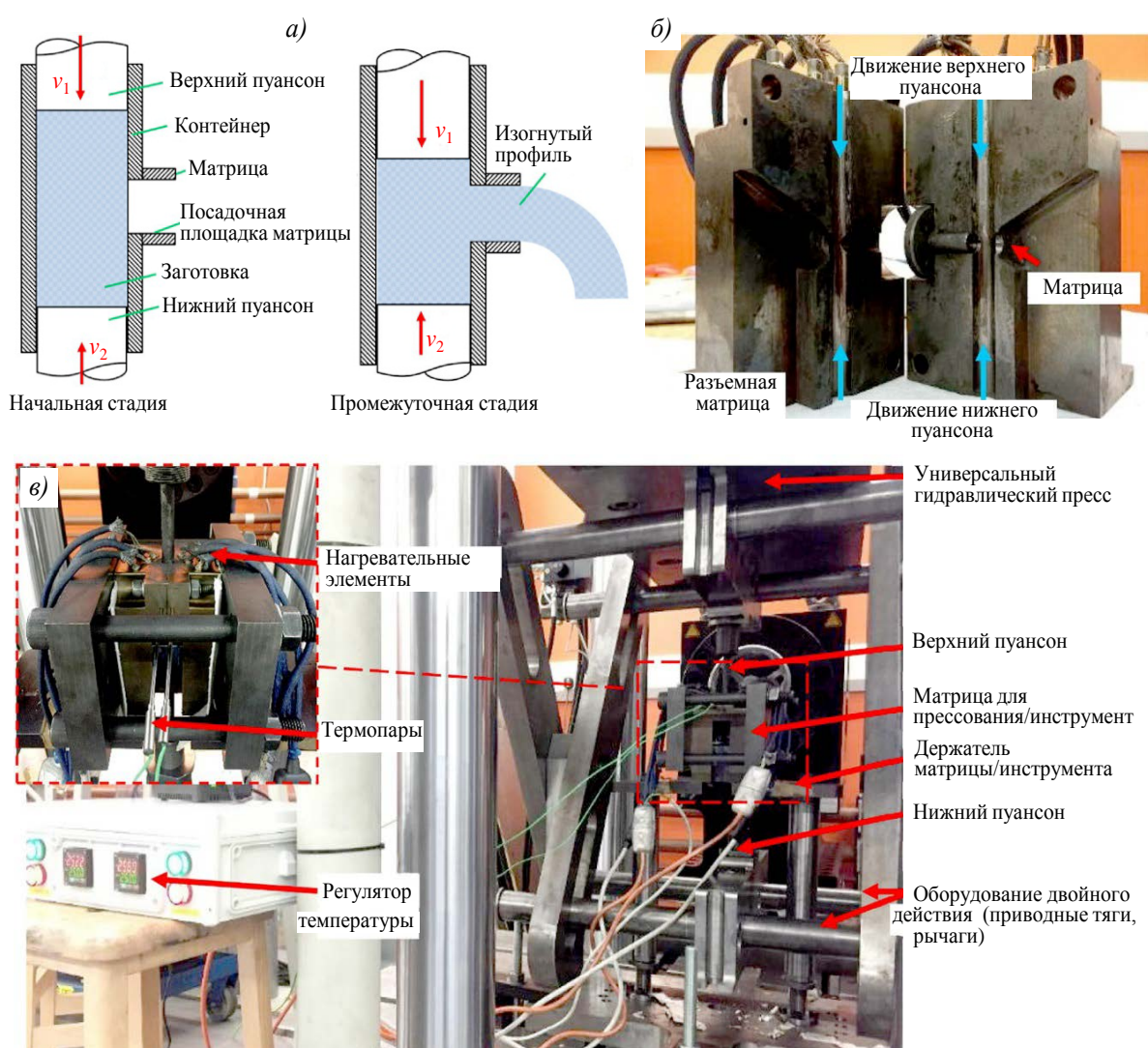


Рис. 1. Принципиальная схема процесса поперечного выдавливания/прессования с различными скоростями деформации v_1 и v_2 (а), разъемная матрица для прессования (экструзии) с нагревательными элементами (б) и экспериментальная установка с набором инструментов для экструзии, установленным на прессе фирмы Instron (в) [14]

Изучены влияние температуры и скорости прессования (деформации) на кривизну, изменение микроструктуры и уровень механических свойств изготавливаемых профилей. Выявлено, что в первую очередь кривизна профиля зависит от соотношения скоростей прессования нижнего (v_2) и верхнего (v_1) пуансона (рис. 2). Установлена корреляция между параметрами микроструктуры и механическими свойствами.

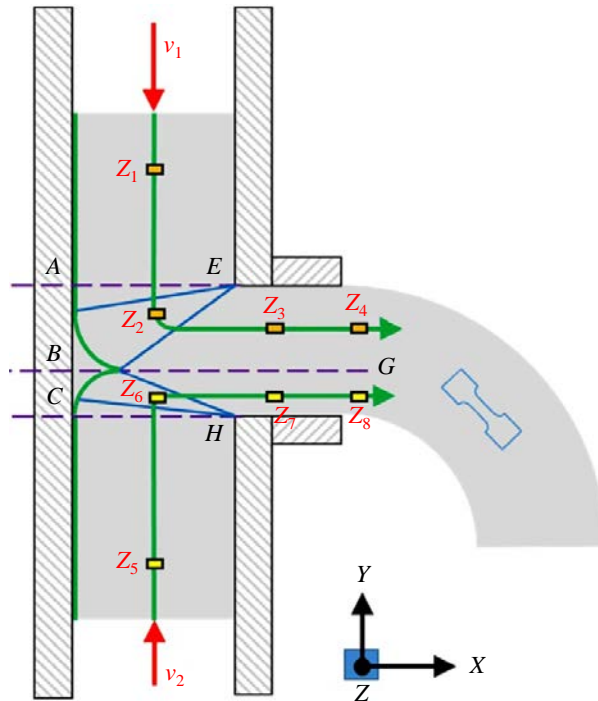


Рис. 2. Режим деформации и схема взятия проб для определения микроструктуры и механических свойств: v_1, v_2 – скорости деформации, Z_1 – Z_8 – места отбора проб прессуемой заготовки и изогнутого профиля. Перед деформацией каждую заготовку предварительно нагревали до температуры прессования [14]

Кроме того, на величину кривизны влияет температура (250, 300 и 350 °С) и скорость прессования (v_1 составляет 0,1 и 1 мм/с) при заданном первоначально соотношении скоростей v_2/v_1 (рис. 3).



Рис. 3. Изменение кривизны изогнутого профиля при соотношениях скоростей деформации v_2 и v_1 1/3 (а), 1/2 (б) и 2/3 (в), при температурах 250, 300, 350 °С и скорости v_1 , равной 0,1 и 1 мм/с [14]

Меньшие значения скорости применяли при температуре нагрева 250 °С ($v_1 = 0,1$ мм/с). С повышением температуры до 300–350 °С скорость деформации v_1

увеличивали до 1 мм/с. Результаты изучения микроструктуры изогнутого профиля подтвердили факт измельчения структуры в зависимости от режима деформации: размер зерна уменьшается с ~25 мкм в исходной заготовке до ~(4–7) мкм в изогнутом профиле (рис. 4 и 5).

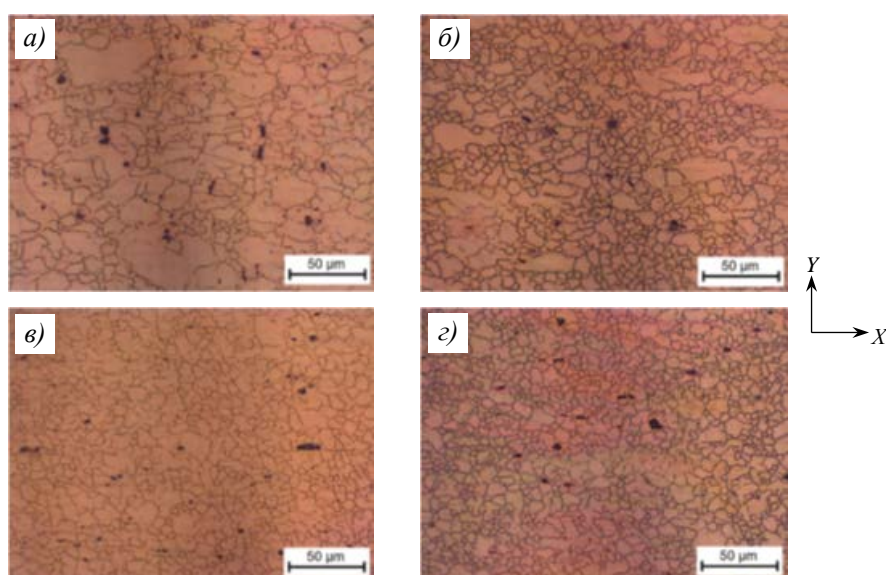


Рис. 4. Эволюция микроструктуры заготовки и изогнутого профиля вдоль линии течения в плоскости симметрии XY при температуре 300 °C и скорости 0,1 мм/с в зоне отбора проб Z_1 (а), Z_2 (б), Z_3 (в) и Z_4 (г) [14]

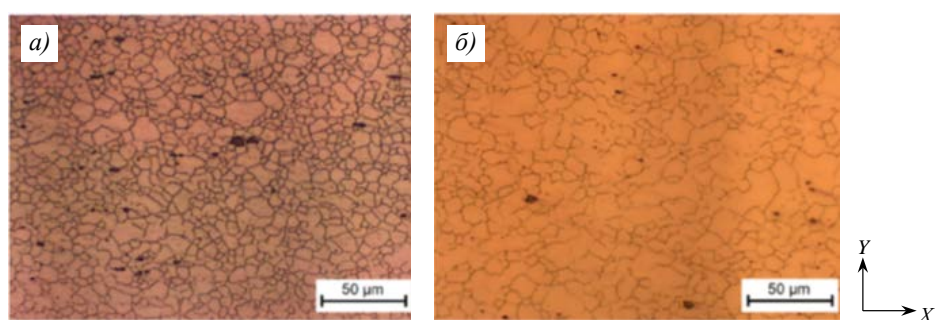


Рис. 5. Микроструктуры зоны Z_4 изогнутых профилей (при соотношении скоростей деформации $v_2/v_1 = 1/2$), сформированных при температуре 350 (а) и 300 °C (б) и скорости деформации v_1 , равной 0,1 (а) и 1 мм/с (б) [14]

Результаты испытания величины микротвердости α -твердого магниевого раствора и значения основных механических свойств профилей при растяжении (предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения) подтвердили повышение этих характеристик при определенных параметрах деформации по сравнению с исходной заготовкой. Это можно объяснить фактором измельчения зерен при прохождении частичной динамической рекристаллизации. При скорости деформации $v_1 = 0,1$ мм/с при повышении температуры нагрева с 250 °C через каждые 50 °C до температуры нагрева 350 °C свойства изогнутого профиля изменяются. Максимальный уровень свойств определен для прутков, подвергнутых деформации при 300 °C ($v_1 = 0,1$ мм/с). Все образцы вырезаны в области изгиба согласно рис. 2. Основные механические свойства изогнутых прутков представлены в таблице.

**Механические свойства изогнутых прутков
при растяжении в продольном направлении [14]**

Температура деформации, °С	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
250	260	155	15
300	278	170	24

Примечание. Изогнутые прутки получены при скорости деформации $v_1 = 0,1$ мм/с и соотношении скоростей деформации $v_2/v_1 = 1/2$.

Таким образом, в рассмотренной работе предложен коммерчески выгодный путь изготовления изогнутых профилей достаточно сложной конфигурации из серийного магниевых сплава AZ31 всего за одну операцию. Работы проведены в лабораторных условиях на профилях лабораторного масштаба с ограниченной длиной. Однако, по мнению авторов работы [14], технология DVSE может с успехом применяться для производства изогнутых профилей требуемых габаритов в промышленных масштабах.

Легирование редкоземельными элементами (РЗЭ) и использование традиционной термомеханической обработки позволяют существенно повысить служебные характеристики магниевых сплавов, но приводят к значительному их удорожанию [7–10, 21–26].

Авторами работы [21] разработан новый технологический процесс изготовления тонкого листа из сплава системы Mg–6Al–4Sn–1Zn (марки ATZ641). Сплав не содержит редких и дорогих металлов. Метод изготовления предусматривает совмещение двух видов деформации: прессования (экструзии) и высокоскоростной прокатки (high-speed rolling – HSR). В итоге это позволяет получить катаный лист с высоким для магниевых сплавов уровнем механических свойств при растяжении: условным пределом текучести $\sigma_{0,2} \approx 410$ МПа, пределом прочности $\sigma_b \approx 442$ МПа и относительным удлинением $\delta \geq 5,1$ %.

В качестве исходного материала для исследования использованы слитки сплава ATZ641 диаметром 86 мм и длиной 100 мм. После двухступенчатой гомогенизации слитки отпрессованы в прутки диаметром 15 мм при температуре 350 °С с определенной степенью деформации и малой скоростью прессования $\sim 1,2$ мм/с. Сплав из таких прутков получил обозначение ATZ641-350E32.

Для дальнейшего эксперимента, включающего HSR, из прутков сплава вырезаны пластины толщиной 2,1 мм и шириной 15 мм в направлении деформации.

Полученные пластины из сплава ATZ641 нагревали до температуры 300 °С в течение 15 мин, скорость прокатки составила ~ 1000 м/мин, прокатку проводили без предварительного нагрева валков. Выполнено три прохода с обжатиями 10, 15 и 15 %. Между проходами заготовки нагревали при температуре 300 °С в течение 5 мин, затем подвергали охлаждению на воздухе. Сплав после HSR обозначен как ATZ641-350E32-HSR.

Микроструктуру образцов исследовали методами оптической микроскопии, автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Первоначально в структуре прессованных прутков установлено наличие выделений интерметаллидных фаз состава $Mg_{17}Al_{12}$, Mg_2Sn , равномерно распределенных по границам зерен и выделяющихся во время прессования до операции HSR. Авторами работы [21] доказано, что при проведении операции HSR происходит существенное измельчение зерна (до нанодисперсных размеров). Этот процесс протекает именно на стадии деформации при HSR, что объясняется прохождением динамической рекристаллизации (рис. 6 и 7).

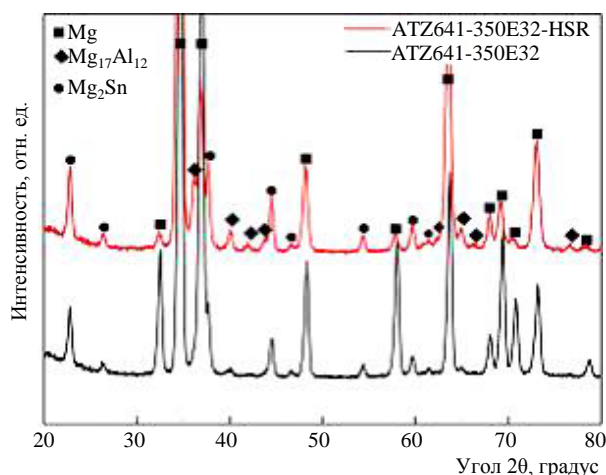


Рис. 6. Рентгенограммы сплавов ATZ641-350E32 и ATZ641-350E32-HSR [21]

На рис. 7, *a* показана оптическая микрофотография структуры сплава ATZ641-350E32 в прессованном состоянии. Результаты микроисследований подтвердили, что микроструктура сплава ATZ641-350E32 состоит из равноосных полностью динамически рекристаллизованных зерен. Средний размер зерна сплава составляет $\sim 5,3$ мкм.

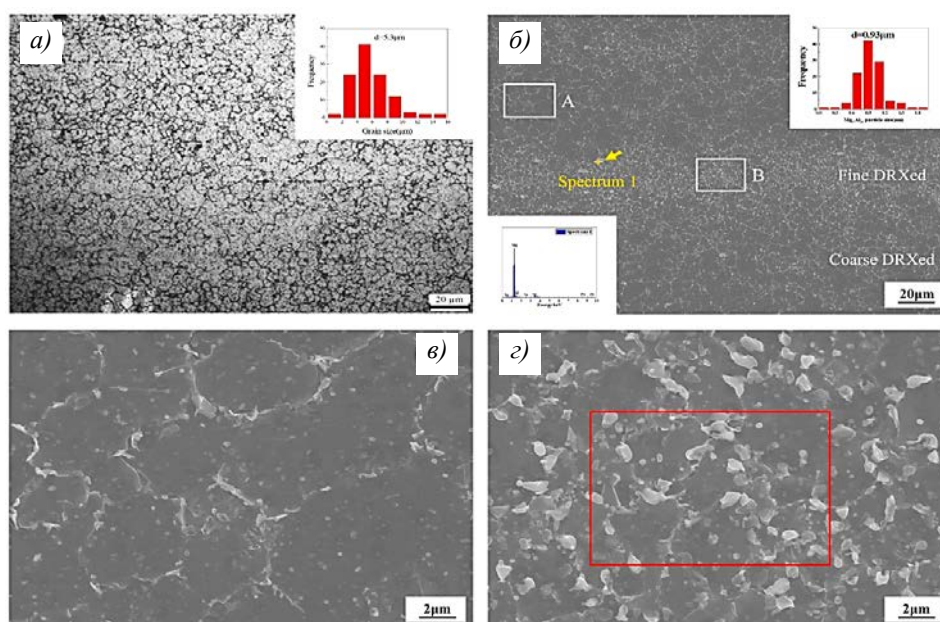


Рис. 7. Оптическая (*a*) и полученные методом FESEM (*б–г*) микрофотографии структуры сплава ATZ641-350E32 с малым (*б*) и большим увеличением (*в, г*) грубых (Coarse DRXed) (*в*) и мелких динамически рекристаллизованных областей (Fine DRXed) (*г*), отмеченных зонами А и В соответственно (*б*); выделения частиц фазы $Mg_{17}Al_{12}$ и их достаточно однородное распределение (*г*); графики распределения зерен по размерам (*a, б*) и результаты качественного рентгеноспектрального микроанализа α -твердого раствора (*б*) [21]

В то же время динамическая рекристаллизация в значительной степени стимулируется благодаря нанодисперсным выделениям указанных фаз состава $Mg_{17}Al_{12}$ и Mg_2Sn . Эти выделения в свою очередь инициируют образование зародышей новых зерен и также способствуют формированию определенного количества субзерен. Мелкозернистая структура и нанодисперсные выделения фаз приводят к усилению механизма

скольжения, следствием чего является улучшение технологичности сплава (в частности, его прокатываемости) [21].

Кроме того, высокий уровень механических свойств объясняется не только мелкозернистым упрочнением, но и высокой плотностью остаточных дислокаций и формированием многочисленных гибридных частиц интерметаллидных фаз $Mg_{17}Al_{12}$ и Mg_2Sn . Гибридные частицы характеризуются бимодальными размерами (микро- и нанометрическими), причем выделения частиц фазы $Mg_{17}Al_{12}$ в основном имеют микрометрические размеры, а частицы фазы Mg_2Sn – субмикрометрические (рис. 8, а).

Это подтверждается микрофотографиями образцов, полученными методом ПЭМ в светлом поле для сплавов ATZ641-350E32 (рис. 8, б) и ATZ641-350E32-HSR (рис. 8, в). Видно также, что микроструктура сплава ATZ641-350E32 состоит из областей, свободных от дислокаций, наблюдаются лишь единичные рассеянные дислокационные линии.

Результаты анализа тонких структур и фазового состава сплавов ATZ641-350E32 и ATZ641-350E32-HSR (рис. 8, б, в) позволяют утверждать, что формирование высокой плотности частиц интерметаллидных фаз $Mg_{17}Al_{12}$ и Mg_2Sn , образующихся как при пресовании, так и при последующей HSR, подавляет процесс динамической рекристаллизации и таким образом способствует образованию значительного количества субзерен посредством закрепления наночастиц интерметаллидных фаз, блокирующих их рост [21].

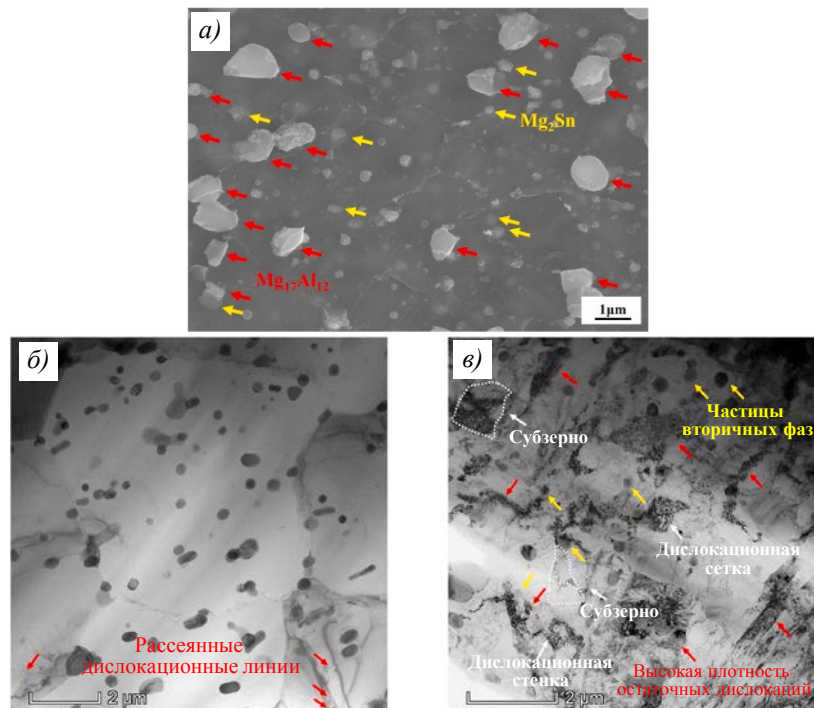


Рис. 8. Микрофотографии структуры сплавов ATZ641-350E32-HSR (а, в) и ATZ641-350E32 (б), полученные методами FESEM (а) и ПЭМ (б, в) [21]

Другим ответственным направлением развития технических и технологических возможностей деформируемых магниевых сплавов служит разработка новых составов на основе магния, которые могли бы соответствовать требованиям по воспламеняемости, предъявляемым FAA (Федеральным управлением гражданской авиации США). Подобные работы проводили также отечественные исследователи. В результате разработан деформируемый магниевый сплав марки ВМД16, содержащий РЗЭ. Этот сплав отличается хорошим сочетанием высоких механических характеристик и стойкостью к воспламенению [22–24].

За рубежом предложены сплавы марок WE43 и Elektron 21, содержащие большое количество РЗЭ в качестве легирующих компонентов. Эти сплавы достаточно успешно прошли огневые испытания. Однако в первую очередь во внимание принимается экономическая целесообразность применения подобных материалов. Поэтому дальнейшие разработки были направлены на магниевые сплавы, способные проявлять огнестойкость, но не содержащие РЗЭ либо легированные ими в минимально допустимых количествах [25–27].

В результате в фокусе внимания оказались сплавы системы Mg–Al–Ca. Выявлено, что кальций обеспечивает огнезащитный эффект, обусловленный образованием дополнительных оксидных слоев. Кроме того, кальций снижает реакционную способность магниевого расплава, что делает его обработку более безопасной и менее сложной. Сплавы, содержащие кальций, менее подвержены самовоспламенению при повышенных температурах, в частности во время термообработки и при нагреве под деформацию. Это позволяет проводить обработку без использования вредных для окружающей среды и строго регламентированных фторидных газов [28–32].

Магниевые сплавы, содержащие кальций, значительно дешевле, чем другие сплавы с высокими эксплуатационными характеристиками. Интерес к этим сплавам в значительной мере возрос в начале XXI в. Сплавы, содержащие кальций, можно подвергать таким технологическим видам обработки, как литье под высоким давлением, прессование, прокатка по разработанным оптимальным схемам деформации и др. [30]. Однако более подробные исследования показали, что введение кальция в малых количествах (до 1,0–2,0 % (по массе)) недостаточно для получения эффекта высоких прочностных и одновременно хороших огнезащитных характеристик деформированных полуфабрикатов.

Повышение содержания кальция более 2,0–2,5 % (по массе) нежелательно ввиду ухудшения технологических свойств магниевых сплавов. В то же время установлено, что дополнительное легирование этих сплавов даже небольшим количеством иттрия в совокупности с кальцием дает положительный суммарный эффект и значительно повышает уровень прочностных и огнезащитных свойств. Однако совместное введение кальция и иттрия изменяет фазовый состав сплава и приводит к необходимости совершенствования технологических процессов изготовления соответствующих деформированных полуфабрикатов [33, 34].

Внимание разработчиков было обращено к проблеме изучения сплавов на основе системы Mg–Al–Zn–Ca–Y при содержании иттрия в количестве не более 0,5–2,0 % (по массе). При этом легирование столь малым количеством иттрия незначительно удорожает сплавы, но в то же время имеет решающее значение для повышения порога воспламенения. В итоге это позволяет расширить области применения сплавов системы Mg–Al–Zn–Ca–Y, в частности, для изделий авиационной и автомобильной промышленности [35–37].

Корейскими исследователями изучена возможность получения высокопрочных сплавов на основе магния, не содержащих РЗЭ. Следует отметить, что разработка процесса деформации подобных магниевых сплавов, в частности прессования, с использованием обычной экструзии является достаточно сложной технологической задачей.

Перспективной представляется возможность легирования магниевых сплавов оловом. В работе [38] приведены результаты исследования нового магниевых сплава системы Mg–2Sn–2Ca марки TX22, не содержащего РЗЭ. Разработанный технологический процесс прессования (с повышенной скоростью деформации) этих сплавов обеспечивает высокие характеристики при растяжении (относительный предел текучести $\sigma_{0,2} = 443$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 460$ МПа), которые превышают известные значения прочности серийных магниевых сплавов, не содержащих РЗЭ.

Важным обстоятельством является тот факт, что уровень механических свойств сплава TX22 практически не снижается, даже если скорость прессования значительно (в несколько раз) больше, чем это принято для обычных серийных сплавов. Кроме того, сплавы серии TX22 отличаются низким и экономным уровнем легирования.

Повышенный уровень прочностных характеристик рассматриваемых сплавов, содержащих кальций, можно объяснить формированием зерен субмикрометрического размера, монодисперсными нановыделениями интерметаллидных фаз, остаточными дислокациями и сегрегацией на границах зерен атомов кальция, растворенного в α -твердом растворе на основе магния.

Установлено, что в сплавах серии TX22 добавление кальция способствует накоплению пирамидальных дислокаций, которые в конечном итоге трансформируются в низкоугловые границы зерен (low angular grain boundaries – LAGB). Высокая плотность LAGB характерна для матричного α -твердого раствора на основе магния. Механизм прерывистой динамической рекристаллизации (discontinuous dynamic recrystallization) задействован на ранней стадии деформации. На более поздней стадии прессования вступает в действие механизм непрерывной динамической рекристаллизации (continuous dynamic recrystallization), что способствует эффективному повышению скорости зарождения зерен. В то же время сегрегация растворенного кальция на границах субзерен (часто в виде наночастиц фазы Mg_2Ca) может блокировать движение атомов других элементов и замедлять процесс роста субзерен, что в конечном итоге приводит к образованию субмикрометрических матричных зерен [38].

Таким образом, формирование подобной мелкозернистой структуры сплавов серии TX22 способствует эффективному повышению таких характеристик, как предел прочности и условный предел текучести.

Полученные результаты позволяют разработать новую контролируемую стратегию создания экономнолегированных магниевых сплавов со сверхвысокой прочностью.

При этом предложенная технология одноступенчатого прессования при сравнительно низких температурах и высокой скорости деформации открывает новые перспективы для производства из этих сплавов высокоэффективных изделий для крупномасштабного промышленного применения [38].

Для получения необходимых пластических характеристик при проведении деформации магниевые сплавы должны содержать некоторое количество легирующих элементов, повышающих пластичность [39, 40].

Авторы работы [39] предлагают для производства высококачественных деформированных (в частности, прессованных) полуфабрикатов магниевые высоколегированные сплавы системы $Mg-6Al-4Zn-xSn$ (где $x = 1, 2$ и 3 % (по массе)). Сложный и насыщенный состав сплавов этой серии привел к необходимости особенно тщательно отрабатывать технологические режимы деформации.

Установлено, что олово одновременно эффективно повышает прочностные и пластические характеристики, для магниевых сплавов – это исключительное явление. При увеличении содержания олова от 0 до 3 % (по массе) средний размер зерен уменьшается с ~ 11 до ~ 4 мкм. Одновременно количество частиц интерметаллидных фаз Mg_2Sn и $Mg_{17}Al_{12}$ возрастает.

При этом с увеличением содержания олова до 1 % (по массе) преобладают процессы двойникования вдоль плоскостей $\{10\bar{1}2\}$. При температурах выше 225 °C начинают действовать другие плоскости скольжения. Дальнейшее добавление олова до 3 % (по массе) приводит к изменению преобладающих режимов деформации с двойникования вдоль плоскостей $\{10\bar{1}2\}$ до пирамидального скольжения во время испытаний на растяжение в направлении прессования при комнатной температуре.

Благоприятное сочетание предела прочности (~366 МПа) и относительного удлинения (~19 %) в сплаве системы Mg–6Al–4Zn–3Sn в основном объясняется его высокой способностью к деформационному упрочнению, вызванной повышенной активностью неосновного скольжения.

Данная работа открывает новые возможности для разработки высоколегированных деформируемых магниевых сплавов с высоким уровнем механических свойств.

Заключения

Анализ научно-технической литературы последних лет позволяет заключить, что проблема разработки новых технологических процессов при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов с целью расширения их применения в различных областях (от медицины до космического материаловедения) по-прежнему является актуальной.

Для повышения служебных характеристик магниевых сплавов проводятся изыскания новых композиций при минимизировании вводимых дорогих легирующих РЗЭ либо при их замене на ранее широко не использовавшиеся элементы (например, олово). Рассматриваются новые перспективные системы легирования: Mg–Al–Zn–Sn, Mg–Al–Zn–Ca–Y и Mg–Al–Ca.

Применительно к новым сплавам в широком масштабе проводится разработка соответствующих оптимальных технологий изготовления полуфабрикатов, включающих сочетания различных видов деформации (прессование + HSR, прессование + гибка и т. д.). Конструируется оборудование специального назначения для применения нетривиальных видов обработки давлением магниевых сплавов: гидравлический пресс, в котором действуют два перпендикулярных по отношению друг к другу пуансона; прокатный стан, обеспечивающий HSR, и т. д. Интенсивность этих работ свидетельствует о значимости рассмотренной проблемы.

Список источников

1. Zeng Z., Stanford N., Davies C.H.J. et al. Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 64 (1). P. 27–62.
2. Pan F., Yang M., Chen X. A review on casting magnesium alloys: modification of commercial alloys and development of new alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32 (12). P. 1211–1221.
3. Alaneme K.K., Okotete E.A. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys a review of traditional and nascent developments // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Vol. 5 (4). P. 460–475.
4. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications // *Materials and Technologies*. 2019. Vol. 53. Is. 6. P. 881–890.
5. Николас А., Рыльник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // *Аэрокосмический курьер*. 2011. № 1. С. 42–44.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
7. 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.
8. Magnesium Alloys in Aerospace: Benefits and Applications // *MachineMFG: articles*. URL: <https://www.machinemfg.com/ru/magnesium-alloys-in-aerospace> (дата обращения: 01.11.2024).
9. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Овсянников Б.В. Современные деформируемые магниевые сплавы: состояние и перспективы применения в высокотехнологичных отраслях промышленности: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2021. 392 с.
10. Sun L., Bai J., Xue F. et al. The Microstructure and Biocorrosion Behaviors of Mg–Y–Zn Alloy under Different Conditions // *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015. P. 382–388.

11. Harandi S.E., Singh R.K. Cracking of Magnesium Alloys in Bioimplant Applications // Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju, 2015. P. 397–404.
12. Zhao J., Chen L., Yu K. et al. Effects of Surface Treatment on the Biodegradation Behavior of Mg–6%Zn alloy // Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju, 2015. P. 405–408.
13. Sasaki T., Elsayed F., Nakata T. et al. Strong and ductile heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al wrought alloys // Acta Materialia. 2015. Vol. 99. P. 176–186.
14. Zhou W., Lin J., Dean T.A. Microstructure and mechanical properties of curved AZ31 magnesium alloy profiles produced by differential velocity sideways extrusion // Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 11 (2). P. 493–508.
15. Магниевые сплавы: справочник в 2 т. / под ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Т.1: Металловедение магния и его сплавов. Области применения. 232 с.
16. Chen L., Zhang J., Tang J. et al. Microstructure and texture evolution during porthole die extrusion of Mg–Al–Zn alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 259. P. 346–352.
17. Wu W., Zhang P., Zeng X. et al. Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender // Materials Science and Engineering A. 2008. Vol. 486. P. 596–601.
18. Hasegawa O., Manabe K., Murai T. Stretch press bending of AZ31 magnesium alloy extruded square tube // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 2184–2189.
19. Yang Y., Xiong X., Chen. J. et al. Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020 // Journal of Magnesium and Alloys. 2021. Vol. 9 (3). P. 705–747.
20. Song J., Chen J., Xiong X. et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021 // Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 10 (4). P. 863–898.
21. Yan T., Di P., Heng M. et al. Development of ultra-high strength Mg–6Al–4Sn–1Zn alloy sheets by combining extrusion and high-speed rolling // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 29. P. 1487–1497.
22. 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: 10.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.
23. 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). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
24. 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: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
25. 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.
26. Nie J.F., Shin K.S., Zeng Z.R. Microstructure, deformation, and property of wrought magnesium alloys // Metallurgical Materials Transactions A. 2020. Vol. 51 (12). P. 6045–6109.
27. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
28. 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 (11). P. 1089–1094.
29. Qudong W., Wenzhou C., Xiaoqin Z. et al. Effects of Ca addition the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy // Journal of Materials Science. 2001. Vol. 36. P. 3035–3040.

30. Non-flammable magnesium alloy with excellent mechanical properties, and preparation method thereof: pat. CA2781995A1; appl. 04.10.11; publ. 12.04.12.
31. Gneiger S., Papenberg N., Frank S., Gradinger R. Investigations on microstructure and mechanical properties of non-flammable Mg–Al–Zn–Ca–Y alloys // Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2018 – The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, 2018. P. 105–113.
32. Cheng S., Yang G., Fan J. et al. Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of AZ91 alloy at elevated temperatures // Transactions Nonferrous Metals Society of China. 2009. Vol. 19 (2). P. 299–304.
33. Kim Y.M., You B.S., Shim M.-S., Kim N.J. Mechanical properties and high-temperature oxidation behavior of Mg–Al–Zn–Ca–Y magnesium alloys // Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2012 – The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, 2012. P. 217–219.
34. Seetharaman S., Hao Z., Loy L. et al. Development and characterization of new Magnesium-Yttrium-Calcium alloys // Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju, 2015. P. 31–37.
35. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магниеые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
36. Papenberg N., Gneiger S. Closed Die Forging of Mg–Al–Zn–Ca–Y Alloys // Light Metals Technologies. Science Forum Submitted. 2017. Vol. 918. P. 28–33.
37. Dziubinska A., Gontarz A., Dziubinski M., Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications // Advances in Science and Technology – Research Journal. 2016. Vol. 10. P. 158–168.
38. Pan H., Qin G., Huang Y. et al. Development of low-alloyed and rare-earth-free magnesium alloys having ultra-high strength // Journal of Materials Science and Technology. 2024. Vol. 29. P. 1487–1497.
39. Wang X.-Y., Wang Y.-F., Wang C. et al. A simultaneous improvement of both strength and ductility by Sn addition in as-extruded Mg–6Al–4Zn alloy // Journal of Materials Science and Technology. 2020. Vol. 49. P. 117–125.
40. Zhu S.Q., Ringer S.P. On the role of twinning and stacking faults on the crystal plasticity and grain refinement in magnesium alloys // Acta Materialia. 2018. Vol. 144. P. 365–375.

References

1. Zeng Z., Stanford N., Davies C.H.J. et al. Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects. *International Materials Reviews*, 2018, vol. 64 (1), pp. 27–62.
2. Pan F., Yang M., Chen X. A review on casting magnesium alloys: modification of commercial alloys and development of new alloys. *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32 (12), pp. 1211–1221.
3. Alaneme K.K., Okotete E.A. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys a review of traditional and nascent developments. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2017, vol. 5 (4). P. 460–475.
4. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications. *Materials and Technologies*, 2019, vol. 53, is. 6, pp. 881–890.
5. Nicholas A., Rylnik S. Application of magnesium components in the aerospace industry. *Aerokosmicheskiy kuryer*, 2011, no. 1, pp. 42–44.
6. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
7. 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.
8. *Magnesium Alloys in Aerospace: Benefits and Applications*. MachineMFG: articles. Available at: <https://www.machinemfg.com/ru/magnesium-alloys-in-aerospace> (accessed: November 01, 2024).

9. Volkova E.F., Rokhlin L.L., Ovsyannikov B.V. *Modern deformable magnesium alloys: status and prospects of application in high-tech industries: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2021, 392 p.
10. Sun L., Bai J., Xue F. et al. The Microstructure and Biocorrosion Behaviors of Mg–Y–Zn Alloy under Different Conditions. *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 382–388.
11. Harandi S.E., Singh R.K. Cracking of Magnesium Alloys in Bioimplant Applications. *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 397–404.
12. Zhao J., Chen L., Yu K. et al. Effects of Surface Treatment on the Biodegradation Behavior of Mg–6%Zn alloy. *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 405–408.
13. Sasaki T., Elsayed F., Nakata T. et al. Strong and ductile heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al wrought alloys. *Acta Materialia*, 2015, vol. 99, pp. 176–186.
14. Zhou W., Lin J., Dean T.A. Microstructure and mechanical properties of curved AZ31 magnesium alloy profiles produced by differential velocity sideways extrusion. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 11 (2), pp. 493–508.
15. *Magnesium alloys: a reference book in 2 vols*. Ed. M.B. Altman, M.E. Drits, M.A. Timonova, M.V. Chukhrov. Moscow: Metallurgy, 1978. Vol. 1: Metallurgy of magnesium and its alloys. Application areas, 232 p.
16. Chen L., Zhang J., Tang J. et al. Microstructure and texture evolution during porthole die extrusion of Mg–Al–Zn alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 259, pp. 346–352.
17. Wu W., Zhang P., Zeng X. et al. Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 486, pp. 596–601.
18. Hasegawa O., Manabe K., Murai T. Stretch press bending of AZ31 magnesium alloy extruded square tube. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 2184–2189.
19. Yang Y., Xiong X., Chen J. et al. Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, vol. 9 (3), pp. 705–747.
20. Song J., Chen J., Xiong X. et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10 (4), pp. 863–898.
21. Yan T., Di P., Heng M. et al. Development of ultra-high strength Mg–6Al–4Sn–1Zn alloy sheets by combining extrusion and high-speed rolling. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 1487–1497.
22. 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: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
23. 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: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
24. 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: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
25. 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.
26. Nie J.F., Shin K.S., Zeng Z.R. Microstructure, deformation, and property of wrought magnesium alloys. *Metallurgical Materials Transactions A*, 2020, vol. 51 (12), pp. 6045–6109.
27. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.

28. 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 (11), pp. 1089–1094.
29. Qudong W., Wenzhou C., Xiaoqin Z. et al. Effects of Ca addition the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Materials Science*, 2001, vol. 36. P. 3035–3040.
30. *Non-flammable magnesium alloy with excellent mechanical properties, and preparation method thereof*: pat. CA2781995A1; appl. 04.10.11; publ. 12.04.12.
31. Gneiger S., Papenberg N., Frank S., Gradinger R. Investigations on microstructure and mechanical properties of non-flammable Mg–Al–Zn–Ca–Y alloys. *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2018 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2018, pp. 105–113.
32. Cheng S., Yang G., Fan J. et al. Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of AZ91 alloy at elevated temperatures. *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19 (2), pp. 299–304.
33. Kim Y.M., You B.S., Shim M.-S., Kim N.J. Mechanical properties and high-temperature oxidation behavior of Mg–Al–Zn–Ca–Y magnesium alloys. *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2012 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2012, pp. 217–219.
34. Seetharaman S., Hao Z., Loy L. et al. Development and characterization of new Magnesium-Yttrium-Calcium alloys. *Proceedings of the 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 31–37.
35. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokzhukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 00. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
36. Papenberg N., Gneiger S. Closed Die Forging of Mg–Al–Zn–Ca–Y Alloys. *Light Metals Technologies. Science Forum Submitted*, 2017, vol. 918, pp. 28–33.
37. Dziubinska A., Gontarz A., Dziubinski M., Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 2016, vol. 10, pp. 158–168.
38. Pan H., Qin G., Huang Y. et al. Development of low-alloyed and rare-earth-free magnesium alloys having ultra-high strength. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 1487–1497.
39. Wang X.-Y., Wang Y.-F., Wang C. et al. A simultaneous improvement of both strength and ductility by Sn addition in as-extruded Mg–6Al–4Zn alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, vol. 49, pp. 117–125.
40. Zhu S.Q., Ringer S.P. On the role of twinning and stacking faults on the crystal plasticity and grain refinement in magnesium alloys. *Acta Materialia*, 2018, vol. 144, pp. 365–375.

Информация об авторах

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

Алиханян Арман Артакович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Мостяев Игорь Владимирович, ведущий инженер, 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

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

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.12.2024.
The article was submitted 02.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 06.12.2024.