

УДК 669.018.44:669.721.5

Е.Ф. Волкова<sup>1</sup>, И.В. Мостяев<sup>1</sup>, М.В. Акинина<sup>1</sup>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ С РЗЭ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-24-33

*Изложены результаты сравнительного исследования особенностей структуры, фазового состава и механических свойств серийных высокопрочных магниевых сплавов MA19 и MA22, содержащих легирующие РЗЭ неодим (MA19) и иттрий (MA22). Установлено, что иттрий в сплаве MA22 способствует формированию более благоприятных фазового состава и структуры, чем структура и фазовый состав, образующиеся в сплаве MA19. В результате показано, что для сплава MA22 характерна менее выраженная анизотропия прочностных свойств, более высокий запас пластичности и уровень предела текучести при сжатии.*

**Ключевые слова:** высокопрочные магниевые сплавы, анизотропия механических свойств, технология деформации, структура, фазовый состав, редкоземельные элементы.

E.F. Volkova<sup>1</sup>, I.V. Mostyaev<sup>1</sup>, M.V. Akinina<sup>1</sup>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES ANISOTROPY AND MICROSTRUCTURE OF SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM HIGH-STRENGTH MAGNESIUM ALLOYS WITH REE

*The paper presents the results of comparative research of some structure features, phase composition and mechanical properties of commercial high-strength MA19 magnesium alloy and MA22 alloy containing alloying RE elements: Nd (MA19) and Y (MA22). It was established that yttrium in MA22 alloy promotes forming of more favorable phase composition and microstructure, than being formed the same in MA19 alloy. As a result it was showed that there were less expressed anisotropy of strength properties, higher stock of plasticity and the level of yield strength under compression for MA22 alloy, than the same for MA19 alloy.*

**Keywords:** high strength magnesium alloys, anisotropy of mechanical properties, technology of deformation, structure, phase structure, rare earth elements.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

В последние годы проблема снижения массы современных летательных аппаратов становится наиболее актуальной. При замене деталей из алюминиевых сплавов на детали из магниевых сплавов с повышенными прочностными характеристиками может быть достигнута весовая экономия в 20–25%.

Конструкторы перспективных изделий начинают рассматривать магниевые сплавы с улучшенными служебными характеристиками как одно из наиболее целесообразных решений проблемы снижения массы новых летательных аппаратов.

Таким образом, наиболее востребованными становятся высокопрочные магниевые сплавы. К сожалению, в ряде случаев существенным недостатком деформированных

полуфабрикатов из серийных высокопрочных магниевых сплавов (МА5, МА5п.ч., МА14 и др.) является наличие анизотропии механических свойств – в первую очередь это касается прочностных характеристик.

Анизотропия – достаточно распространенное явление для полуфабрикатов из металлических конструкционных материалов. Условно можно рассматривать два вида анизотропии, принимая во внимание структурный признак:

- кристаллическая (гомогенная) анизотропия;
- гетерогенная (волоконистая, строчечная) анизотропия.

Возможно одновременное наличие гомогенной и гетерогенной структуры в материале. Наибольшую опасность представляет анизотропия механических свойств массивных деталей большого сечения, в процессе эксплуатации которых могут возникнуть значительные поперечные напряжения, а свойства в этих направлениях могут быть существенно ниже из-за особенностей технологии их изготовления и природы самого сплава. Анизотропию механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов требуется учитывать при разработке конструкций из них, поскольку в противном случае это приводит к нежелательным последствиям при эксплуатации. Особенно важным представляется разработка сплавов на основе магния и технологий производства из них деформированных полуфабрикатов, характеризующихся минимально возможной анизотропией механических свойств.

Известно, что одним из путей снижения анизотропии механических свойств магниевых сплавов наряду со специально подобранной схемой деформации, может рассматриваться применение определенных редкоземельных элементов (РЗЭ) при легировании. Большинство РЗЭ оказывают благоприятное воздействие на структуру, фазовый состав магниевых сплавов, вызывая повышение таких служебных характеристик, как удельные прочность и жесткость, значения характеристик при сжатии и повышенных температурах [1–5].

Редкоземельные элементы, или лантаноиды, наряду с лантаном отнесены к побочной подгруппе III группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева и достаточно хорошо изучены. Все РЗЭ условно делятся в соответствии с наиболее характерными химическими свойствами на две подгруппы:

- подгруппу цериевых РЗЭ (лантан, церий, празеодим, неодим, самарий и европий);
- подгруппу иттриевых элементов (итрий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий и лютеций) [6–9].

По характеру влияния на свойства магниевых сплавов элементы иттриевой и цериевой подгрупп могут различаться, а это имеет практическое значение при выборе сплава для применения в качестве материала детали в конкретной конструкции [10, 11].

Цель данной работы состояла в исследовании и сравнительном анализе влияния структуры и технологии деформации на величину анизотропии механических свойств деформированных полуфабрикатов из высокопрочных магниевых сплавов, содержащих РЗЭ – неодим и иттрий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

В качестве материала для исследования выбраны прессованные полуфабрикаты, изготовленные в заводских условиях из сплава МА19 системы Mg–Zn–Zr–Nd (состав соответствует ГОСТ 14957–76) и сплава МА22 (ВМД10) системы Mg–Zn–Zr–Y. Слитки сплавов отлиты методом полунепрерывного литья с применением защитной атмосферы. После механической обработки и гомогенизации слитки подвергнуты прессованию

на горизонтальном гидравлическом прессе с усилием 5000 тс, степень деформации составила 88–95%. Изготовлены полосы сечением 20×300 мм и 42×250 мм. Штамповки массой до 5 кг получены при деформации промежуточных заготовок, вырезанных из прессованного прутка, на вертикальном гидравлическом прессе.

Механические свойства сплавов определены при одноосном растяжении по ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9651–84; ГОСТ 11150–84 на испытательной машине Instron; предел текучести при сжатии  $\sigma_{0,2сж}$ , МПа – по ГОСТ 25.503–97.

Микроструктура сплавов исследована на оптическом микроскопе типа МИ-8, оптическом инвертированном микроскопе DM IRM фирмы Leica.

Исследование\* микроструктуры образцов из прессованной полосы сплава МА22 проведено также на непротравленных шлифах с использованием растрового электронного микроскопа JSM6490-LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа INCA450 по РТМ 1.2А-096–2000; фотографии выполнены в режиме СОМРО, изображение в котором формируется обратноотраженными электронами.

Контраст в цвете изображения фрагментов структуры в режиме СОМРО определяется средним атомным номером элементов, входящих в исследуемую область (фазу).

Фазовый состав сплавов изучен методом физико-химического фазового анализа. Химическое изолирование фаз с последующим рентгеноструктурным и химическим анализом изолята по методу порошков проведено на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku. Интерпретация полученных результатов выполнена при помощи программы Gade.

### Результаты и обсуждение

Исследование микроструктуры сплава МА19 в литом и гомогенизированном состояниях показывает, что по границам довольно крупных (120–150 мкм) дендритных ячеек располагается фаза, идентифицируемая как  $Mg_{12}Nd$ . Это согласуется с данными работ [7, 8]. Внутри дендритных ячеек и по их границам формируются частицы цирконидов цинка (рис. 1 а, б).

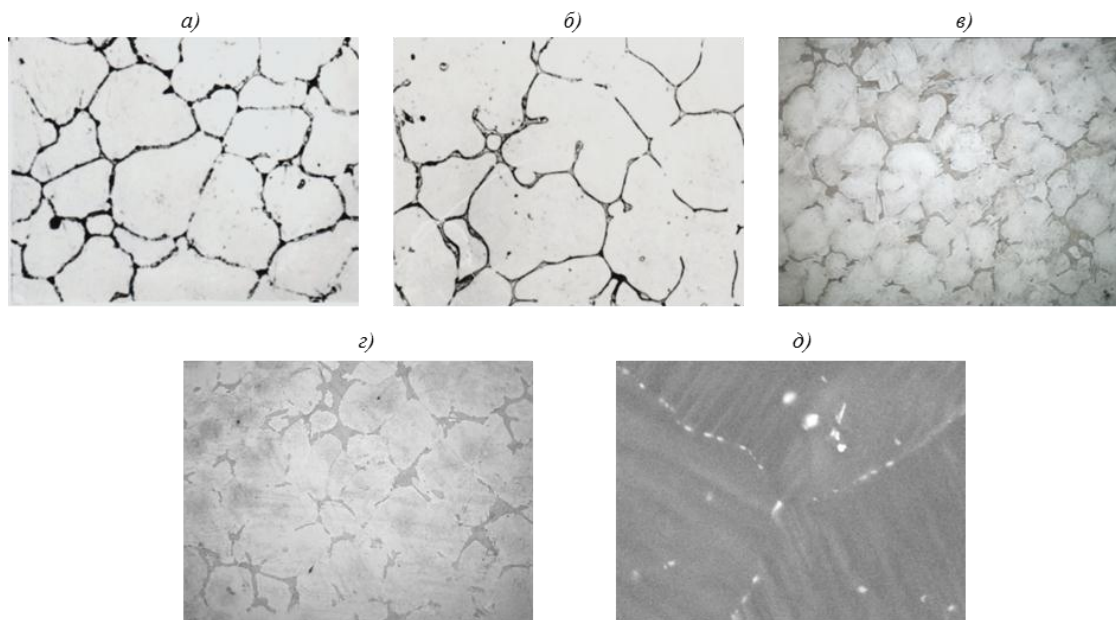


Рис. 1 Микроструктура сплавов МА19 (а, б) и МА22 (в, г) в литом (а, в) и гомогенизированном (б, г) состояниях, ×200; д – дисперсные выделения цирконидов цинка в пограничных областях и в объеме зерна сплава МА22 (гомогенизированное состояние), ×2500

\* Изучение микроструктуры выполнено И.В. Исходжановой и Е.В. Филоновой, фазового состава – Г.И. Морозовой.

Проведение гомогенизации не вызывает растворения основной фазы  $Mg_{12}Nd$ . После гомогенизации наблюдается частичное нарушение сплошности выделений фазы  $Mg_{12}Nd$  на отдельных участках междендритных границ (рис. 1, б).

Микроструктура сплава МА22 в литом и гомогенизированном состояниях визуально имеет достаточно сложное строение (рис. 1, в, г). По границам более мелких, чем у сплава МА19, дендритных ячеек (50–80 мкм) располагаются фрагменты эвтектики.

Ранее в работе [12] состав эвтектики для сплава типа МА22 системы  $Mg-Zn-Zr-Y$  идентифицирован как  $\alpha$ -твердый раствор  $+(Mg, Zn)_5Y$ .

Кроме того, при исследовании на растровом микроскопе подтверждено, что в объеме дендритных ячеек располагаются дисперсные частицы первичных интерметаллидных фаз, в том числе цирконидов цинка –  $Zn_2(Zr, Y)_3$ ,  $Zn_2Zr_3$ , фазы Лавеса  $Zn_2Zr$  (рис. 1, д).

При последующем нагреве под деформацию и после самой деформации фазовый состав сплавов практически не меняется. При этом имеет место измельчение структурных составляющих (рис. 2).

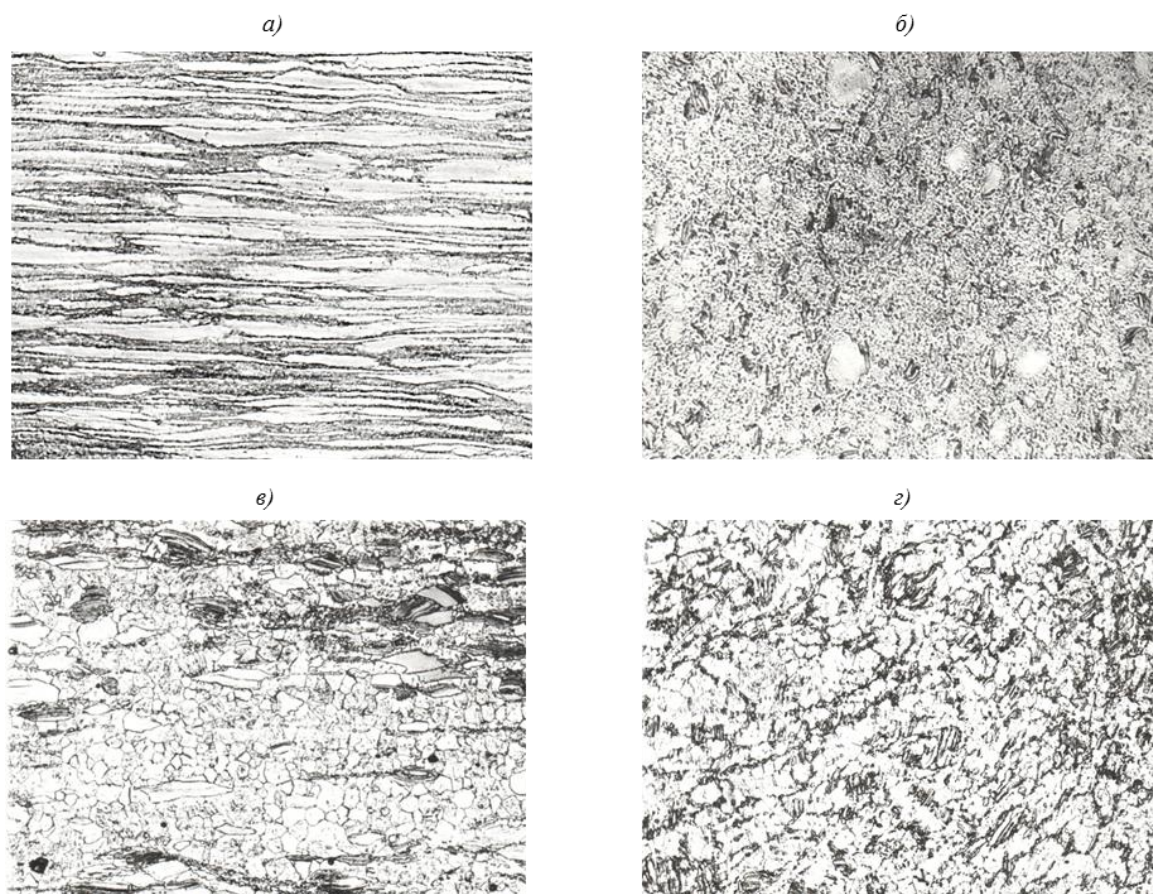


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 250$ ) прессованной полосы из сплавов МА19 (а, б) и МА22 (в, г) в продольном (а, в) и поперечном (б, г) направлениях при степени деформации 94,5–95%

Обращает на себя внимание тот факт, что при сравнительно небольшом увеличении (рис. 2) отчетливо видно различие в характере структуры прессованных полос из сплавов МА19 (рис. 2, а, б) и МА22 (рис. 2, в, г). В долевом направлении структура прессованной полосы из сплава МА19 имеет выраженный строчечный характер: частицы упрочняющей фазы  $Mg_{12}Nd$  вытянуты вдоль оси деформации по границам удлинённых

зерен. Ориентированные в направлении прессования волокна отделены друг от друга частицами фазы  $Mg_{12}Nd$ . Микроструктура в поперечном направлении прессованной полосы из сплава МА19 характеризуется хаотическим распределением дисперсных частиц упрочняющей фазы вблизи зерен округлой формы.

Для сплава МА22 имеет место иная картина: в направлении оси деформации ориентированность зерен не столь ярко выражена; в поперечном и долевом направлениях размер зерна не сильно различается (рис. 2 *в, з*) и составляет не более 8–15 мкм (рис. 3).

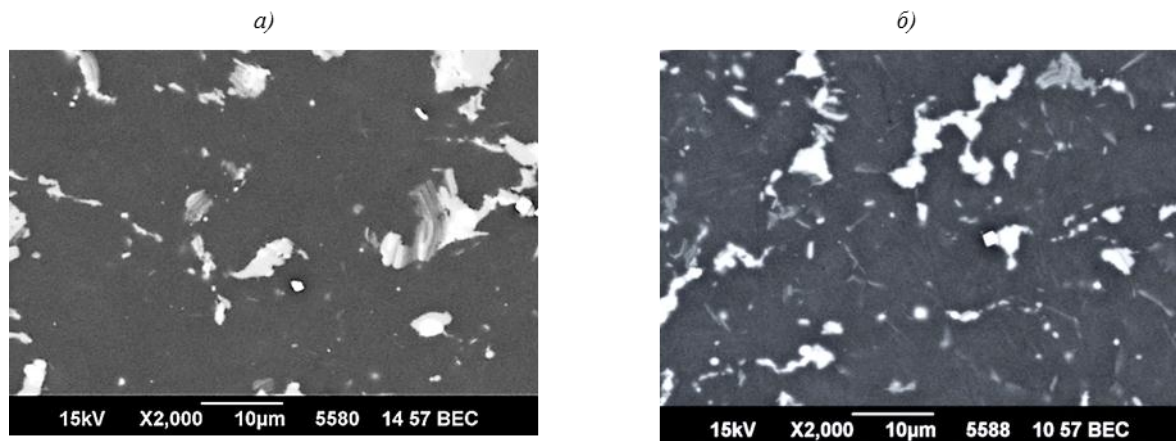


Рис. 3. Микроструктура прессованной полосы из сплава МА22 в продольном (*а*) и поперечном (*б*) направлениях (растровая микроскопия)

Таким образом, редкоземельные элементы иттрий и неодим неоднозначно влияют на ориентированное распределение фаз в процессе деформации. Характер влияния некоторых РЗЭ на структурные изменения при деформации и, соответственно, на уровень механических свойств достаточно подробно рассмотрен зарубежными исследователями [13–16].

Рассмотренные отличия микроструктуры прессованных полос сплавов МА19 и МА22 во многом объясняют закономерности изменения механических свойств (табл. 1) деформированных полуфабрикатов в зависимости от направления (здесь и далее – по отношению к оси деформации).

Проведя анализ показателей механических характеристик, можно выделить несколько особенностей их изменения. При прочих равных условиях на различия в уровне свойств сплава МА19 в зависимости от направления испытания может оказывать влияние степень деформации при прессовании. Когда степень деформации составляет 88%, значения предела прочности в продольном направлении не превышают 302 МПа, предел текучести равен 245 МПа; относительное удлинение находится в интервале 11,6–14,0%. При этом значение коэффициента анизотропии по пределу прочности достигает 15,8%. Коэффициент анизотропии по пределу текучести еще выше:  $\geq 32\%$ . Величина относительного удлинения мало меняется в зависимости от направления испытания механических свойств (таблица 1).

Ужесточение технологических параметров деформации (в частности, увеличение степени деформации) приводит к возрастанию коэффициента анизотропии основных механических свойств и наиболее сильно сказывается на различии величины предела текучести в направлениях вдоль и поперек оси прессования. Изменение степени деформации с 88 до 95% вызывает заметный рост прочностных характеристик прессованной полосы из сплава МА19 в продольном направлении при минимальном росте

аналогичных характеристик в поперечном направлении. Так, средние значения предела прочности возрастают на 16,8% (с 297 до 347 МПа); средние значения предела текучести увеличиваются в ~1,5 раза (с 244 до 335 МПа). При этом отмечается и рост коэффициента анизотропии: по пределу прочности – до 24,2%; по пределу текучести – до 48,4%. Как следует из данных, приведенных в табл. 1, именно для предела текучести при растяжении сплава МА19 наблюдается максимальный коэффициент анизотропии. Известно, что эта характеристика является наиболее структурно-чувствительной при статических испытаниях. Одновременно имеет место снижение величины относительного удлинения в обоих направлениях в ~2 раза.

Таблица 1

**Сравнительные свойства прессованных полос сечением до 60 см<sup>2</sup>  
из высокопрочных магниевых сплавов (без термообработки)**

Сплав	Степень деформации, %	Значения свойств при температуре испытания 20°C в направлении						Коэффициент анизотропии прочностных свойств*, %	
		продольном (Д)			поперечном (П)				
		$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ ,	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ ,	по $\sigma_B$	по $\sigma_{0,2}$
		МПа		%	МПа		%		
МА19	~88,0	295	245	14,0	250	162	12,0	15,8	32,8
		302	243	11,5	253	168	10,0		
		295	242	14,0	250	164	11,3		
		300	245	13,4	246	163	11,1		
Средние значения		297	244	13,2	250	164	11,1		
МА19	~95,0	345	336	5,7	261	174	6,5	24,2	48,4
		349	336	8,1	261	173	6,6		
		349	332	6,8	267	174	6,5		
		Средние значения		347	335	6,9	263		
МА22	~95,0	345	256	12,0	305	209	20,4	9,6	15,0
		331	252	16,4	304	209	17,2		
		328	231	20,0	303	210	22,4		
		Средние значения		335	246	16,1	303		

\*  $(\sigma_D - \sigma_P) / \sigma_D$ .

Для сплава МА22 даже при высокой степени деформации (95%) коэффициент анизотропии по пределу прочности не превышает 9,6%, предела текучести 15%. Значения относительного удлинения остаются высокими для обоих направлений испытания ( $\delta=12,0-22,4\%$ ).

Таким образом, в продольном направлении сплав МА19 имеет некоторые преимущества по величине предела прочности и текучести по сравнению со сплавом МА22 по абсолютным значениям этих характеристик. Одновременно сплав МА19 значительно уступает сплаву МА22 по абсолютным значениям прочностных свойств в поперечном направлении вырезки полос, отпрессованных со степенью деформации 95%, а также по величине относительного удлинения (табл. 1).

При испытании на сжатие деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов МА19 и МА22 установлено, что такая ответственная характеристика, как предел текучести при сжатии ( $\sigma_{0,2сж}$ ) для сплава МА19 не превышает 180–205 МПа для всех исследованных деформированных полуфабрикатов. При прочих равных условиях для сплава МА22 величина предела текучести при сжатии штамповки составляет от 235 (высотное направление, минимальное значение) до 260 МПа (продольное направление,

максимальное значение); для прессованной полосы  $\sigma_{0,2сж}=248\text{--}265$  МПа (интервал значений приведен по всем направлениям).

Основное объяснение малой анизотропии прочностных свойств прессованной полосы из сплава МА22, повышенного уровня этих свойств, хорошего запаса пластичности заключается в особенностях микроструктуры и фазового состава этого сплава:

– основной  $\alpha$ -твердый раствор сплава МА22 насыщен упрочняющими легирующими элементами – в первую очередь иттрием и цинком;

– в матрице сплава –  $\alpha$ -твердом растворе – достаточно равномерно распределены частицы упрочняющих фаз: фазы Лавеса  $ZrZn_2$  и фазы переменного состава  $Zn_2(Zr, PЗЭ)_3$  в виде высокодисперсных включений;

– эти частицы ориентированы хаотически равномерно, не следуют направлению деформации, в отличие от упрочняющей фазы  $Mg_{12}Nd$  в сплаве МА19, которая имеет четко выраженную геометрическую направленность (так называемую «строчечность») параллельно оси деформации;

– изначально – в литом и гомогенизированном состояниях, а также после деформации сплав МА22 из-за своей природы обладает более мелкозернистой и равноосной структурой, чем сплав МА19.

Таким образом, в сплаве МА22 сбалансированный химический состав и присутствие иттрия в качестве основного легирующего компонента формируют особый фазовый состав и мелкозернистую структуру и активно способствуют повышению уровня основных свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ), определяемых при статических испытаниях в различных направлениях по отношению к оси деформации, при одновременном снижении их анизотропии.

В сплаве МА19 редкоземельный элемент неодим не столь эффективно улучшает механические свойства, как иттрий в сплаве МА22. Характер выделений упрочняющей фазы  $Mg_{12}Nd$ , как установлено ранее, крайне неблагоприятен.

Некоторые исследователи с целью формирования более благоприятных структуры и фазового состава магниевого сплава рассматривают возможность его дополнительного легирования небольшим количеством олова [17, 18].

Однако, по мнению авторов данной статьи, предпочтительным представляется исследовать возможность повышения прочностных свойств и снижения коэффициента анизотропии механических характеристик в сплаве МА19 путем использования более сложной схемы деформации при изготовлении деформированных полуфабрикатов. Подобные пути снижения выраженной анизотропии, как в случае сплава МА19, изложены в работах отечественных и зарубежных исследователей [2, 19–24].

Таким образом, изготовление штамповок массой до 5 кг из сплава МА19 проводится по двум различным технологическим схемам. Первая схема предусматривала получение штамповки массой до 5 кг из прессованного прутка, использованного в качестве промежуточной заготовки. По второй схеме деформации в соответствии с известными технологическими приемами сделана попытка максимально избежать строчечности структуры путем предварительной обработки давлением промежуточной заготовки с преобладанием схемы всестороннего неравномерного сжатия. Для этого введена дополнительная операцияковки прессованной промежуточной заготовки. Затем проведена собственно объемная деформация с получением штамповки массой до 5 кг.

Штамповка из сплава МА22 получена непосредственно из прессованной промежуточной заготовки без дополнительной операцииковки.

Результаты испытания механических свойств штамповок из сплава МА19 (изготовленных по двум схемам деформации), а также штамповок из сплава МА22 представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнительные свойства штамповок массой до 5 кг  
из высокопрочных магниевых сплавов (без термообработки)**

Сплав	Вид исходной заготовки	Значения свойств при температуре испытания 20°C в направлении								
		радиальном			хордовом			высотном		
		$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %
		МПа		%	МПа		%	МПа		%
МА19	Прессованный пруток	263	229		8,0	318		283	6,6	
		267	225	6,8	310	274	9,6	239	216	9,9
		260	231	8,2	315	277	6,5	241	217	7,9
Средние значения		263	244	7,7	314	278	7,6	237	215	9,3
МА19	Прессованный пруток+ +дополнительная ковка	300	263	15,0	319	290	6,5	272	235	8,0
		302	269	10,8	319	290	7,0	269	240	12,0
		304	270	12,0	313	285	7,5	274	241	7,6
Средние значения		302	267	12,6	317	288	7,0	272	239	9,2
МА22	Прессованный пруток	336	260	17,0	328	246	18,0	309	248	15,5
		338	262	19,0	330	243	21,1	321	244	17,1
		324	257	17,4	323	248	22,0	306	245	19,0
Средние значения		333	260	17,8	327	246	20,3	312	246	17,2

Сравнительный анализ полученных значений свойств свидетельствует о том, что при применении в качестве промежуточной заготовки предварительно прессованного прутка максимальный уровень прочностных свойств штамповки из сплава МА19 наблюдается в хордовом направлении:  $\sigma_B=310-318$  МПа,  $\sigma_{0,2}=274-283$  МПа. Эти значения соответственно на 19,4 и 14% больше, чем в радиальном направлении, и на 32,5 и 29,3% – чем в высотном направлении. При этом средние значения относительного удлинения сохраняются на хорошем уровне по всем исследованным направлениям ( $\delta=7,6-9,3\%$ ).

Введение дополнительной операции ковки прессованной промежуточной заготовки позволяет заметно поднять уровень значений предела текучести в первую очередь в радиальном и высотном направлениях штамповки сплава МА19 (на 8–15%). В хордовом направлении прирост этих свойств составляет порядка 1–3%. Величина относительного удлинения возрастает в радиальном направлении до 10,8–15% (в ~1,5 раза), в остальных направлениях – сохраняется практически на том же уровне, что и для штамповок, изготовленных из промежуточного прессованного прутка. В итоге для сплава МА19 в случае применения усложненной схемы деформации промежуточной заготовки наблюдается снижение анизотропии прочностных свойств до значений коэффициента анизотропии 10–16%. Общий уровень показателей предела прочности остается невысоким:  $\sigma_B=272-317$  МПа (табл. 2). Однако следует учитывать возможное удорожание всего технологического цикла изготовления штамповок из сплава МА19 при введении операции дополнительной ковки промежуточной прессованной заготовки.

Для получения штамповок из сплава МА22 использован вариант без дополнительной ковки заготовок из прессованного промежуточного прутка. Максимальные значения предела прочности (336 МПа) и предела текучести (260 МПа) в радиальном направлении превышают всего на 9,3 и на 6% соответственно эти же характеристики в минимальном (высотном) направлении.

Таким образом, подтверждено, что сплав МА22 по своей природе менее склонен к проявлению анизотропии механических свойств, чем сплав МА19.

## Заключения

1. Исследовано влияние структуры и фазового состава на величину основных механических свойств и их анизотропию для деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов МА19 и МА22, содержащих РЗЭ – неодим и иттрий.

2. Установлено, что при прочих равных условиях величина коэффициента анизотропии прочностных свойств прессованных и штампованных полуфабрикатов из сплава МА19 в 1,5–2,0 раза выше, чем для тех же полуфабрикатов из сплава МА22.

3. Дополнительное усложнение схемы деформации сплава МА19 способствует снижению коэффициента анизотропии прочностных свойств. Так, в высотном направлении коэффициент анизотропии снижается с 29,3–32,5 до 10–16%, однако общий уровень прочностных свойств остается невысоким.

4. Малая анизотропия и повышенный уровень прочностных свойств деформированных полуфабрикатов из сплава МА22, хороший запас пластичности могут быть объяснены формированием мелкозернистой структуры, благоприятной морфологией частиц упрочняющих фаз (фазы Лавеса  $ZrZn_2$  и фазы переменного состава  $Zn_2(Zr, PZЭ)_3$ ) в виде высокодисперсных включений, в отличие от упрочняющей фазы  $Mg_{12}Nd$  с выраженной направленностью в продольном направлении («строчечности») в сплаве МА19.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №10 (58). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
3. Великий В.И., Ярьско К.И., Шаломеев В.А. и др. Перспективные магниевые сплавы с повышенным уровнем свойств для авиадвигателестроения // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. №9. С. 32–38.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.К. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
5. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. №10. С. 7–8.
6. Каблов Е.Н., Волкова Е.Ф., Филонова Е.В. Исследование влияния РЗЭ на фазовый состав и свойства нового жаропрочного магниевых сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. №7. С. 19–26.
7. Дриц М.Е., Рохлин Л.Л., Падежнова Е.М. и др. Магниевые сплавы с иттрием. М.: Наука, 1979. 162 с.
8. Рохлин Л.Л. Магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы. М.: Наука, 1980. 192 с.
9. Рохлин Л.Л. Структура и свойства сплавов системы Mg–PЗМ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. №11. С. 18–22.
10. Landkof V. Magnesium Alloys and Their Application // Proceedings of International Congress (Germany, Sept. 26–28, 2000). Weinheim, 2000. P. 168–172.
11. Kainer Karl Ulrich. Magnesium alloys for structural application // Minerals, Metals and Material Society. 2000. Vol. 52. No. 11. P. 198–199.
12. Волкова Е.Ф. Некоторые закономерности формирования фазового состава магниевых сплава системы Mg–Zn–Zr–Y // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. №9. С. 22–28.

13. Bohlen J., Yi S.B., Letzig D., Kainer K.U. Effect of rare earths elements on the microstructure and texture development in magnesium-manganese alloys during extrusion // *Materials Science Engineering*. 2010. Vol. 527. P. 7092–7098.
14. Dobroň P., Chmelík F., Yi S. et al. Grain size effects on deformation twinning in an extruded magnesium alloy tested in compression // *Scripta Metallurgica*. 2011. No 65. P. 424–427.
15. Koike I. New Deformation Mechanisms in Fine-Grain Mg Alloys // *Proceedings of Conference Magnesium Alloys 2003 // Materials Science Forum*. 2003. Vol. 419–422. P. 189–194.
16. Shao X.H., Yang Z.Q., Ma X.L. Strengthening and toughening mechanism in Mg–Zn–Y alloy with a long period stacking ordered structure // *Acta Metallurgica*. 2010. Vol. 58. No. 14. P. 4760–4771.
17. Jiang L., Zhang D., Fan X. et al. Influence of 0–2 wt.% Sn addition on the microstructure and mechanical properties of extruded AZ80 alloy // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015)*. 2015. P. 128–136.
18. Sasaki T.T., Elsayed F.R., Nakata T. Strong and Ductile Heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al Extruded Alloy // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015)*. 2015. P. 5–9.
19. Кочубей А.Я., Серебряный В.Н. Влияние термомеханических параметров на формирование текстуры и структуры при горячей обработке давлением сплава системы Mg–Al–Zn // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 105–109.
20. Разуваев Е.И. Новые технологии производства деформированных полуфабрикатов // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков*. М.: ВИАМ, 1994. С. 171–174.
21. 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 // *Materials Science Engineering: A*. 2013. Vol. 563. P. 21–27.
22. Quan G., Ren L., Lv J. et al. The Effect of Processing Procedures on Mechanical Properties of High Strength Mg Alloys // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015)*. 2015. P. 923–929.
23. Kocks U.F., Tome C.N., Wenk H.R. *Texture and Anisotropy*. Cambridge University Press. 1998. P. 676–677.
24. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Влияние легирующих элементов и структурных факторов на жаропрочность магниевых сплавов // *Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №9. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-7-7.