



# Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор)

Е.Ф. Волкова

Май 2006

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Металловедение и термическая обработка металлов», № 11, 2006 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

# Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор)

Е. Ф. Волкова

*Всероссийский институт авиационных материалов*

*Приведен анализ современного состояния в области деформируемых магниевых сплавов и композиционных материалов на основе магния. Подтверждена значимость этих материалов в современных отраслях техники. Доказано, что по основным физическим и механическим характеристикам магниевые деформируемые сплавы могут реально конкурировать с алюминиевыми сплавами аналогичного назначения. Отмечена перспективность сплавов системы Mg–Zn–Zr–PЗМ. Рассмотрены некоторые наиболее эффективные технологии производства деформируемых полуфабрикатов из сплавов магния, включающие, в частности, процесс литья с повышенными скоростями при кристаллизации, гидропрессование, свехпластическую деформацию, бесслитковую прокатку и др. Сделан прогноз о дальнейшем успешном развитии направления материаловедения, включающего разработку как традиционных сплавов, так и новых материалов на магниевой основе и расширение сферы их применения путем освоения перспективных технологий производства из них деформируемых полуфабрикатов.*

## **Введение**

Основным преимуществом магния и его сплавов является малая плотность, составляющая всего 65–70% от плотности промышленных алюминиевых сплавов. Как конструкционный материал магниевые сплавы обладают известными преимуществами: высокими удельной прочностью и удельной жесткостью, хорошими демпфирующими характеристиками, технологичностью, что представляется весьма перспективным для их

применения в различных отраслях современной техники. Значимость и актуальность материалов на основе магния подтверждается положительной динамикой роста производства первичного магния (за последние 20 лет оно практически удвоилось и составило ~550 тыс. т в 2004 г.).

С конца 80-х годов XX века успешно функционирует Международная Магниева Ассоциация<sup>1</sup> и ее европейское отделение – Европейская Исследовательская Магниева Ассоциация<sup>2</sup>, объединяющая свыше 30 крупнейших фирм Западной Европы. При поддержке этих международных организаций в Германии в г. Аалене с 1990-х годов проводится ежегодный Международный Семинар по применению магниевых сплавов в автомобильной промышленности и других отраслях. О серьезном подходе к возможностям дальнейшего внедрения магния в современные отрасли техники развитых стран Запада свидетельствует тот факт, что в последние годы выполняются дорогостоящие общеевропейские программы по изысканию новых и усовершенствованию существующих сплавов на основе магния и технологий их производства. В частности, Еврокомиссией финансируется проект MAGNEXTRUSCO, в котором рассмотрены возможности повышения технологических, механических и коррозионных свойств магниевых сплавов путем применения новых технологий литья и деформации [1, 2]. При поддержке Еврокомиссии в рамках 6-й Европейской программы исследований и технологий в аэрокосмической области осуществляется проект АЭРОМАГ («Применение деформируемых магниевых сплавов в аэрокосмической технике»), в котором ФГУП «ВИАМ» участвует в качестве самостоятельного и равноправного партнера.

Известно, что деформируемые магниевые сплавы и ранее широко применялись в изделиях авиакосмической техники и в ракетостроении (детали управления, детали кресел самолетов, посадочных устройств, фюзеляжей ракет и т.п.). Отечественные космические программы

---

<sup>1</sup> IMA (International Magnesium Association).

<sup>2</sup> ERAM (The European Research Association for Magnesium).

выполнялись с использованием деформируемых магниевых сплавов МА2-1, МА12, МА14 и др. в конструкциях космических аппаратов по программам: «Восток», «Восход», «Союз», «Луна», «Венера». В конструкциях космических аппаратов вопрос применения легких материалов на основе магния остается по-прежнему значимым. В частности, намечено применение новых высокопрочных материалов на основе магния в рамных конструкциях космических аппаратов нового поколения. Современная авиакосмическая техника остро нуждается в разработке «прорывных» технологий и материалов на основе магния, способных успешно заменить серийные сплавы на основе алюминия. Стратегическим направлением в области разработки сплавов на основе магния остается повышение их весовой эффективности и улучшение технологичности наряду с повышением коррозионной стойкости. Разработка высокопрочных магниевых деформируемых сплавов с удельной прочностью свыше 15–17 км делает их реальным конкурентом по отношению к соответствующим алюминиевым сплавам. Такая задача может быть решена несколькими путями.

### ***Сравнительный анализ серийных магниевых сплавов***

Магниевые сплавы по своему химическому составу относятся к двум основным базовым системам легирования: Mg–Al–Zn–Mn и Mg–Zn–Zr. Магниево-литиевые сплавы вследствие их специфичности и малого объема применения в данном случае не рассматриваются. Общей закономерностью магниевых сплавов, по нашему мнению, является то, что повышение суммарного содержания легирующих элементов свыше 5–6% (масс.) резко снижает не только технологичность, но вызывает ухудшение коррозионной стойкости и свариваемости сплавов и является, таким образом, критическим порогом легирования. Классическое исследование поведения магния и его сплавов в процессе деформации проведено Е.Ф. Эмли более 30 лет назад [3]. Способность магниевых сплавов к пластической деформации значительно снижается, когда наряду с природным фактором (ГПУ-решетка) воздействует фактор повышенной гетерофазности сплава.

На основе собственных многолетних исследований можно утверждать, что легирование сплавов элементами в количестве, меньшем критического уровня, дает возможность применять к ним далее обработку давлением практически по любой схеме, включая прокатку. При содержании легирующих элементов выше этого уровня предпочтительной является деформация сплавов по схеме всестороннего сжатия, т.е. прессование, штамповка и ковка в закрытых штампах. Величина критического суммарного содержания легирующих элементов устанавливается эмпирически для сплавов каждой системы легирования.

В зависимости от назначения серийные сплавы делятся на сплавы средней, повышенной прочности и жаропрочные. Система Mg–Al–Zn–Mn стала основой для таких широко применяемых сплавов, как MA2-1, MA2-1пч, MA2, MA5, MA5пч (американские сплавы-аналоги: AZ31B, AZ61A, AZ80, AZ91, AZ92). Сплавы системы Mg–Zn–Zr – MA14 (аналог США – ZK60A), MA20 (аналог США – ZE10A), MA15, MA19, ВМД10 (не имеют зарубежных аналогов) также достаточно широко применялись и применяются в отечественных летательных аппаратах. Удельная прочность некоторых разработанных серийных магниевых сплавов в ряде случаев превосходит удельную прочность серийных сплавов на основе алюминия аналогичного назначения (табл. 1). Однако для реальной замены в конструкциях узлов и деталей алюминиевых сплавов на магниевые необходимо достижение соответствия или превосходства последних по целому ряду механических, коррозионных и иных характеристик.

Таблица 1.

## Типичные свойства легких магниевых сплавов

Сплав (аналог)	Система легирования	Вид полуфабриката	Удель- ная проч- ность, кМ	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{в}$	$\sigma_{0,2сж}$	$\delta$ , %	$\sigma_{в св.соед}$ (сварное соединение), МПа
					МПа				
МА2-1, МА2-1пч (AZ31В)	Mg-Al-Zn- Mn	Листы Прессованные прутки и трубы	14,3	Отжиг	215 167	255 267	– 185	18 11	230–240 –
МА5, МА5пч (AZ80, AZ91)		Прутки, поковки, штамповки	17	Закалка + старение	235	304	135	9	Не сваривается
МА14 (ZK60А)	Mg-Zn-Zr	Поковки, штамповки	17	То же	245	304	145	12	Не сваривается
ВМД10	Mg-Zn-Zr- РЗМ	Прутки, полосы, трубы, штамповки	18	Отжиг	260	345	275	10	295
ВМД7-1	Mg-Zn-Zr- РЗМ	Прутки	19	Без т/о	310	370	315	6	Нет данных
АА2024 (Д16)	Mg-Zn-Zr- РЗМ	Прутки, полосы	15,8	Закалка + старение	295	440	–	12	Не сваривается

***Пути развития деформируемых сплавов и материалов на основе магния***

По нашему мнению, возможности повышения физических, механических и эксплуатационных характеристик магниевых сплавов могут быть реализованы следующим образом: 1) путем комплексного легирования расплава с применением современной бесфлюсовой технологии получения слитков, их последующей многоступенчатой обработки давлением без термической обработки или в сочетании с ней; 2) путем применения качественно новой бесслитковой технологии производства как полуфабрикатов, так и конкретных деталей (порошковая металлургия, бесслитковая прокатка и т.п.); 3) благодаря разработке композиционных материалов нового поколения на основе магния.

В первом случае литые или гомогенизированные заготовки первоначально подвергают обработке давлением по одной схеме, а затем при получении требуемой структуры к ним могут быть применены другие виды и схемы деформации в зависимости от конечной цели: равноканальное угловое прессование (РКУП), изотермическая деформация в условиях

сверхпластического течения металла, гидропрессование и др. Что касается РКУП, этот метод достаточно экзотичен, хотя и позволяет значительно измельчить структуру и добиться высокого уровня прочности [4]. Однако для серийного производства РКУП магниевых сплавов вряд ли может быть рекомендовано в ближайшем будущем.

Практически по каждому из остальных направлений нами накоплен большой экспериментальный опыт. Изучение поведения как серийных, так и новых магниевых сплавов в процессе деформации позволило нам установить некоторые закономерности, способствующие проявлению эффекта сверхпластичности (СП), в целом характерные для сплавов на основе других металлов: сплав должен быть гетерофазным, причем морфология и состав вторичных фаз играют решающую роль: размер зерна в сплавах не должен превышать 10–15 мкм; в качестве основного механизма при сверхпластической деформации следует рассматривать зернограничное скольжение.

Сплавы системы Mg–Zn–Zr, безусловно, обладают большей склонностью к проявлению сверхпластичности, чем остальные изученные нами магниевые сплавы. Ранее нами доказано, что цирконий является не только хорошим модификатором магниевых сплавов, но для сплавов базовой системы Mg–Zn–Zr он остается основным фазообразующим элементом. Наблюдается четкая зависимость между особенностями морфологии цинк-циркониевых фаз (в частности, фазы Лавеса  $ZrZn_2$ ) и величиной характеристик пластичности сплавов МА14, МА20-СП при температуре испытания [5]. На основании результатов экспериментальных работ по сравнительному исследованию влияния температурно-скоростных параметров деформации в режиме сверхпластического течения на свойства конечных полуфабрикатов нами оптимизированы технологические параметры деформации сплавов системы Mg–Zn–Zr–РЗМ: МА2-1, МА14, ВМД10 и сплава типа ВМД7-1 [6]. Установлено, что комплексное легирование сплавов базовой системы Mg–Zn–Zr малыми добавками РЗМ в наибольшей степени способствует

проявлению эффекта сверхпластичности. При оптимальных для каждого сплава температурно-скоростных параметрах деформации относительное удлинение ( $\delta$ ) и коэффициент скоростной чувствительности ( $m$ ) составляют: для сплава МА2-1 –  $\delta=150\%$ ,  $m=0,20$ ; для сплава МА14 –  $\delta=230\%$ ,  $m=0,30$ ; для сплава ВМД10 –  $\delta=290\%$ ,  $m=0,37$ ; для сплава ВМД7-1 –  $\delta=320\%$ ,  $m=0,43$ ; для сплава МА20-СП –  $\delta=345\%$ ,  $m=0,38$ . Для сравнения из перечисленных сплавов только МА2-1 относится к системе Mg–Al–Zn–Mn.

Нами разработаны сплавы повышенной (ВМД7-1) и средней прочности (МА20-СП), обладающие способностью проявлять сверхпластичность при соответствующих условиях деформации (рис. 1). В результате сверхпластической деформации этих сплавов характеристики пластичности конечных полуфабрикатов возрастают в 1,5–2 раза при одновременной стабилизации их прочностных характеристик и снижении относительной анизотропии механических свойств с 15–20% до 3–8%. Эта закономерность подтверждена, в частности, на штамповках и поковках сплава ВМД7-1 заводского изготовления (массой 10–15 кг). Такая же зависимость характерна для штамповок и поволоков из сплава ВМД10.

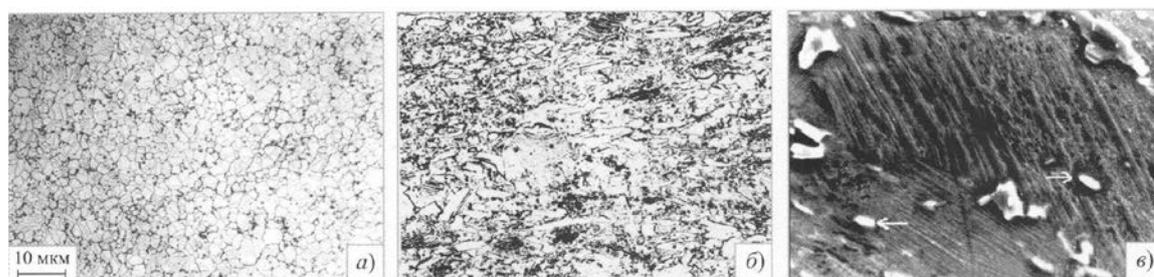


Рисунок 1. Микроструктура сплавов в продольном направлении:  
*a* – МА20-СП (лист),  $\times 500$ ; *б* – ВМД7-1 (пруток),  $\times 500$ ; *в* – циркониды  
цинка в сплаве ВМД7-1 (указаны стрелками),  $\times 1500$

Сплав средней прочности МА20-СП предназначен в первую очередь для получения катаных полуфабрикатов. Последующее изготовление тонкостенных деталей (1,0–1,5 мм) сложной конфигурации возможно методом пневмоформовки из листов этого сплава [7]. Экономно легированный сплав МА20-СП хорошо сваривается и не склонен к

коррозионному растрескиванию, имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогами (табл. 2). Сплав получил международное признание: он отмечен серебряной медалью на Международном Салоне изобретений в Женеве (6–10 апреля 2005 г.).

Таблица 2.

Типичные свойства технологических легких магниевых сплавов  
(листы толщиной 1,0–3,0 мм)

Сплав	Удельная прочность, км	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2\text{сж}}$	$\delta$ , %	$\sigma_{\text{в св.соед.}}$ (сварное соединение), МПа
			МПа				
МА20-СП	15,4	Без т/о	215	265	185	16	230
МА20	13	Отжиг	158	225	137	18	215
ZE10A	12	Отжиг	124	207	–	15	Нет данных
AA2024	6,5	Отжиг	76	180	–	20	Не сваривается
AA5083	15,8	T4, T351	290	440	–	19	Нет данных
	12	H321, H115	230	315	–	14	
	11	Отжиг	145	290	–	20	

При гидропрессовании (гидроэкструзии) деформируемое тело находится в условиях всестороннего равномерного сжатия<sup>3</sup> за счет воздействия жидкости или квазижидкости, предотвращающей контактирование деформируемого материала со стенками контейнера и снижающей силу трения в очаге пластической деформации. Впервые процесс деформации магниевых сплавов с применением метода гидропрессования (ГП) был изучен нами в начале 90-х годов прошлого века. В 1993 г. нами запатентован способ обработки магниевых сплавов на основе систем Mg–Zn–Zr, Mg–Zn–Zr–PЗМ, Mg–Zn–Mn, включающий процесс ГП и позволяющий повысить прочностные характеристики этих сплавов на 20–25% [6]. Было установлено, что применение ГП со степенью деформации 25–40% позволяет получить наибольший прирост прочностных характеристик в сплавах МА14 и ВМД10:  $\sigma_{\text{в}}=400\text{--}420$  МПа,  $\sigma_{0,2}=\sigma_{0,2\text{сж}}=350\text{--}370$  МПа при  $\delta=4,5\text{--}8,0\%$ . В результате исследований структуры на сканирующем микроанализаторе УХА 840 с Link-приставкой установлено, что одноступенчатое ГП прутков сплавов

<sup>3</sup> При гидроэкструзии деформируемое тело в очаге деформации находится в условиях действия объемного разнонаправленного напряженного состояния.

системы Mg–Zn–Zr вызывает интенсивное развитие процессов двойникования, дробление фаз и зерен (рис.2, *a*, *б*). Применение двухступенчатого ГП приводит к развитию начальной стадии полигонизации и одновременно к динамическому старению: на линиях скольжения и двойникования наблюдается зарождение ультрамелкодисперсных упрочняющих цинкциркониевых фаз (рис. 2, *в*). Это и объясняет 25–30%-ный прирост прочностных свойств этих сплавов [8].

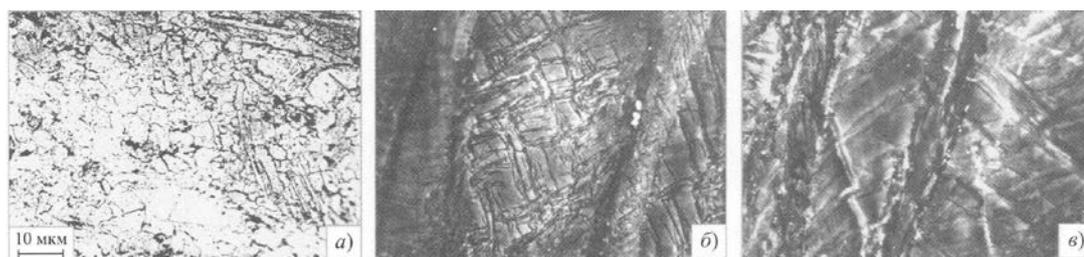


Рисунок 2. Микроструктура сплава МА14 (прутки): *a* – прессование из слитка (без термической обработки),  $\times 500$ ; *б* – прессование из слитка + ГП с  $\varepsilon=25\%$ ,  $\times 1000$ ; *в* – прессование из слитка + ГП с  $\varepsilon=(25+15)\%$ ,  $\times 1000$

В настоящее время в рамках проекта MAGNEXTRUSCO специалисты ЕС завершают разработку промышленной технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и деталей с применением гидростатической экструзии и формовки. В качестве потребителя выступают ведущие фирмы автомобилестроения: Audi, Centro Ricerche Fiat и авиакосмической техники – EADS [1].

Кардинальные изменения структуры, вплоть до аморфного состояния, можно получить, управляя скоростью охлаждения металлического расплава в процессе кристаллизации (частный случай порошковой металлургии – «быстрая кристаллизация»). В зависимости от величины этой скорости, конструкции установки и прочих технологических факторов получают гранулы, гибкие ленты, частицы пластинчато-чешуйчатой формы и т.п. Совместно с ВИЛС нами разработаны два магниевых гранулированных сплава: МА2-1<sub>гр</sub> и МА14<sub>гр</sub>. Временное сопротивление разрыву деформируемых полуфабрикатов из сплавов, изготовленных с применением гранульной технологии, на 15–20% выше этой характеристики

соответствующих полуфабрикатов из сплавов-аналогов, полученных по серийной технологии. Заметный эффект получен также по пределу текучести при растяжении (20–25%), при сжатии (до 40%), а также по ударной вязкости (увеличение в 3–5 раз).

Скорость охлаждения при изготовлении гранул составила порядка  $10^2$ – $10^3$  К/с. В лабораторных условиях на экспериментальных сплавах нами изучены закономерности изменения структуры и свойств прессованных прутков сплавов систем Mg–Al–Zn–PЗМ, Mg–Al–Zn–Zr–Si, Mg–Al–Zn–Mn–Si и других при реализации скоростей охлаждения  $10^5$ – $10^6$  К/с. Сплавы системы Mg–Al–Zn–PЗМ признаны наиболее перспективными. На прессованных прутках сплавов этой системы удалось получить высокие значения  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{0,2}$  (430–495 МПа и 320–380 МПа соответственно) при  $\delta=4$ –8% [9]. Это обусловлено высокой степенью диспергирования всех элементов структуры (рис. 3, а, б). Нами установлено, что наиболее эффективным может стать синтез нескольких технологических процессов, в частности, гидропрессование экструдированных прутков сплава, полученных по гранульной технологии. В результате такого совмещенного технологического процесса, примененного к сплаву типа МА14<sub>гр</sub> (аналог – ZK60А), в структуре сплава происходят значительные изменения. Наследственно мелкая структура гранул за счет дополнительной деформации становится еще более высокодисперсной (рис. 3, в). В результате становится возможным достижение значительного уровня прочностных характеристик ( $\sigma_{\text{в}}=435$ – $455$  МПа,  $\sigma_{0,2}=375$ – $390$  МПа) при хорошем запасе пластичности –  $\delta=5,5$ – $8,0\%$ . Тем не менее, следует отметить, что многоэтапная технология изготовления конечных полуфабрикатов с применением «быстрой кристаллизации» пока достаточно сложна и не гарантирует стабильности свойств этих полуфабрикатов. С практической точки зрения более выгодна применяемая в настоящее время в Германии промышленная технология бесслитковой прокатки, в которой совмещен процесс быстрой кристаллизации расплава металла с процессом высокоскоростной деформации при одновременной

термической обработке. Регулирование технологических факторов позволяет получать регламентированную структуру листовых полуфабрикатов, что гарантирует требуемый уровень свойств. На листах сплава типа AZ31 получены следующие свойства:  $\sigma_b=320\text{--}330$  МПа,  $\delta=12\text{--}21\%$  [10]. Наличие мелкозернистой регламентированной структуры в этих сплавах позволяет применять операции глубокой вытяжки и формовки и изготавливать детали сложной геометрии для изделий автомобильной и авиационной промышленности [10].

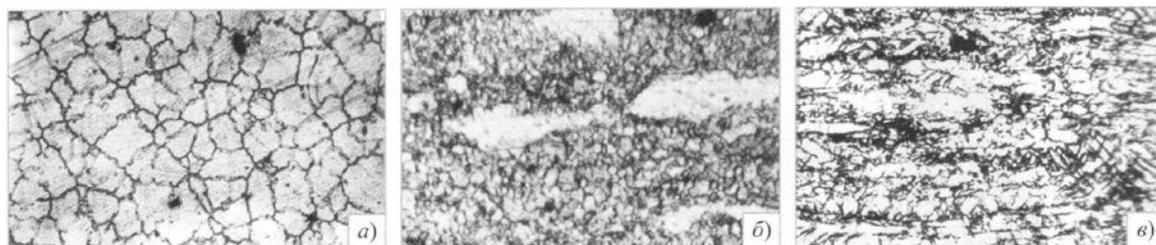


Рисунок 3. Микроструктура гранулированного сплава MA14<sub>гр</sub>:  
*a* – исходная (гранулы диаметром 1,5–3,0 мм),  $\times 500$ ; *б* – прессованный пруток,  $\times 1000$ ; *в* – прессованный пруток + ГП с  $\varepsilon=30\%$ ,  $\times 1000$

Особый класс составляют композиционные материалы на магниевой основе. В настоящее время известно большое количество композитов, различающихся как упрочняющими компонентами, так и технологией изготовления. Во ФГУП «ВИАМ» разработан композиционный материал (КМ) системы Mg–B (при объемной доле волокон бора 30%), который обладает чрезвычайно высокими характеристиками прочности, жаропрочности и выносливости:  $\sigma_b=950$  МПа,  $E=1320$  ГПа,  $\sigma_{100}^{300^\circ\text{C}}=585$  МПа,  $\sigma_{-1}=635$  МПа на базе  $N=10^7$  циклов при плотности  $\rho=2,0$  г/см<sup>3</sup>. Однако, пластичность этого КМ недостаточна:  $\delta=0,6\%$ . Углмагниевого композиционный материал (УМКМ) также является весьма перспективным. По некоторым свойствам УМКМ превосходит выше рассмотренный КМ системы Mg–B:  $E=2150$  ГПа,  $\rho=1,8$  г/см<sup>3</sup>. Особое значение имеет тот факт, что УМКМ обладает уникально низким коэффициентом линейного термического расширения:  $\alpha=0,1\cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. Это дает возможность

рекомендовать УМКМ для применения в конструкциях космических летательных аппаратов.

К сожалению, высокая стоимость и нерешенные проблемы по коррозии, анизотропии и технологии соединения не позволили приступить к серийному освоению этих КМ. Очевидно, требуется их доработка. Реальная отдача от использования композитов в летательных аппаратах позволит достаточно быстро окупить затраты.

## **Выводы**

В последние годы сфера применения магниевых сплавов в качестве конструкционного материала для современных отраслей техники активно расширяется. Магниевые деформируемые сплавы по своим механическим и эксплуатационным характеристикам являются реальными конкурентами алюминиевым сплавам.

Основным рычагом управления свойствами магниевых сплавов остается структурный фактор. В этом плане роль легирующих элементов для магниевых сплавов по-прежнему велика.

Сочетание современных технологии литья и деформации обеспечивает получение качественно нового уровня прочностных характеристик известных экономно легированных сплавов на основе магния ( $\sigma_b=400-420$  МПа,  $\sigma_{0,2}=350-370$  МПа).

Сплавы системы Mg–Zn–Zr–PЗМ наиболее перспективны для применения к ним нетрадиционных способов деформации; возможности этих сплавов полностью еще не реализованы.

Для магниевых сплавов весьма перспективна технология «быстрой кристаллизации» со скоростями охлаждения  $10^6-10^8$  К/с, позволяющая получать полуфабрикаты с качественно новым уровнем прочностных характеристик (в частности, с удельной прочностью свыше 30 км). В ближайшие годы следует ожидать широкого промышленного освоения технологии высокоскоростной кристаллизации магниевых сплавов.

Развитие композиционных материалов на магниевой основе, обладающих сверхвысокими характеристиками прочности, при решении проблемы их антикоррозионной защиты, снижении анизотропии и с учетом разработки технологии соединения матрицы и упрочняющих волокон позволит реализовать уникальные возможности КМ и приведет к значительному вытеснению ими традиционных сплавов.

### **Список литературы:**

1. Bohlen J., Letzig D., Kainer K.U., Vet P.J. Hydrostatic extrusion process for the efficient production of magnesium structural components: The MAGNEXTRUSCO project // 12<sup>th</sup> Magnesium Automotive and End User Seminar, September 2004. Aalen, Germany.
2. Sillekens W.H., Veltmans P.P.H. et al., Forming of magnesium extrusions: Basic investigations into bending and hydro-forming // 12<sup>th</sup> Magnesium Automotive and End User Seminar, September 2004. Aalen, Germany.
3. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1972. С. 229–276.
4. Сегал В.М. и др. Пластическое структурообразование в металлах. Минск: Наука и техника, 1994. С. 220.
5. Волкова Е.Ф., Морозова Г.И. Влияние цирконидов цинка на механические и технологические характеристики магниевых сплавов // Технология легких сплавов. 2004. № 5. С. 20–24.
6. Волкова Е.Ф. Исследование процесса деформации высокопрочных магниевых сплавов в режиме сверхпластичности // Научно-технический сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2003. Вып. № 3. С. 27–31.
7. Разуваев Е.Л., Горбань Н.Н., Волкова Е.Ф. и др. Пневмоформовка листовых материалов в состоянии сверхпластичности // Сб. ст. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2002 гг. / Под ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСиС, ВИАМ. 2002. С. 160–166.
8. Волкова Е.Ф. Повышение свойств деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов методом нетрадиционной технологии // Технология легких сплавов. 1993. № 10. С. 6–10.
9. Волкова Е.Ф., Лебедев В.М., Гуревич Ф.Л. Влияние скорости охлаждения при кристаллизации на структурно-фазовое состояние деформируемых магниевых сплавов // МиТОМ. 1998. № 5. С. 27–31.

10. Engl Bernhard. Application potentials and a new production technology for magnesium sheet // 12<sup>th</sup> Magnesium Automotive and End User Seminar, September 2004, Aalen, Germany.