

УДК 669.721.5

Е.Ф. Волкова¹**АНАЛИЗ И ИТОГИ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«МАГНИЙ–21. НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ» (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-86-94

Представлен обзор наиболее интересных докладов III Международной конференции «Магний–21. Новые горизонты». Приведен анализ результатов исследования фазового состава, физико-механических свойств новых магниевых сплавов, разработанных зарубежными и отечественными исследователями, а также современных методов их антикоррозионной защиты. Показано, что существует устойчивая тенденция к расширению использования редкоземельных элементов в качестве легирующих компонентов новых сплавов на основе магния с целью повышения их характеристик.

Ключевые слова: магниевые сплавы, фазовый состав, механические свойства, антикоррозионные покрытия, редкоземельные элементы.

The article represents the survey of the most interesting papers presented on the III International conference and exhibition «Magnesium–21. Broad horizons». An analysis of the results of researches of phase composition, physical and mechanical properties of new magnesium alloys that were worked out by foreign and domestic researchers are hereby represented. It is shown that there is a strong trend towards widening use of rare earth elements as the alloying components of new magnesium alloys to improve their properties.

Keywords: magnesium-based alloys, phase composition, mechanical properties, surface treatments for the improvement of the corrosion resistance, rare-earth elements.

¹Федеральное 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

В Санкт-Петербурге с 22 по 24 апреля 2014 г. прошла Третья Международная конференция и выставка «Магний–21. Новые горизонты», одним из организаторов которой выступила компания «Алюсил» (ALUSIL). На форуме был рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся исследования и разработки передовых технологий производства, защиты от коррозии, потребления и рециклинга магниевых сплавов. Конференция проходила в России в третий раз.

Ведущая роль ВИАМ как крупнейшего отечественного материаловедческого института, широко известного за пределами России, была подчеркнута приглашением сотрудника ВИАМ, доктора технических наук Е.Ф. Волковой поучаствовать в работе состава Международного программного комитета конференции.

Известно, что сплавы на основе магния с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности являются наиболее легким перспективным конструкционным материалом. Эти сплавы обладают по сравнению с другими металлическими конструкционными материалами рядом преимуществ: малой плотностью, высокими удельными прочностью и жесткостью, хорошими демпфирующими и усталостными характеристиками, технологичностью, свариваемостью. За рубежом и в России эти сплавы находят применение

в современных отраслях техники: электронике, медицине, автомобильной, авиационной и космической промышленности и т. д., что объясняет растущий интерес со стороны разработчиков [1–3]. В «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» сплавы на основе магния занимают достойное место [4].

Конференция получила поддержку со стороны ведущих отечественных и зарубежных организаций, крупных исследователей, ученых, производителей и потребителей магниевой продукции, в том числе: Международной магниевой ассоциации, Китайской магниевой ассоциации, Европейской исследовательской магниевой ассоциации, фирм Германии, Австрии, Израиля, Китая, Южной Кореи и других. На конференции Россию представляли ведущие специалисты отечественных научно-исследовательских и академических институтов, авиационных фирм, предприятий-производителей полуфабрикатов из магниевых сплавов: ФГУП «ВИАМ», ОАО «КУМЗ», НИТУ «МИСиС», ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского», Российская академия наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, ООО «СМВ-инжиниринг», ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет» в содружестве с University of Nova

Goricia (Словения); Monash University (Австралия) и др. Достаточно высоким был уровень представительств вузов и ведущих научно-исследовательских институтов, фирм зарубежных стран: European Research Association for Magnesium e.V. (Германия), Magnesium Elektro (Великобритания), Ben-Gurion University (Израиль), College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, National Engineering Research Center for Magnesium Alloys (Китай), Chongqing (Китай), Advanced Materials Research Center (Китай), Chongqing Academy of Science and Technology (Китай), Mg Monthly Review (США), Magnesium Technology Innovation Center School of Materials Science and Engineering Seoul National University (Республика Корея), School of Materials Science and Engineering (Республика Корея).

Проведены заседания сессий по направлениям:

- Современные литейные и деформируемые магниевые сплавы;
- Коррозия и окончательная (финишная) защитная отделка сплавов.

По первому направлению были заслушаны и обсуждены доклады, посвященные вопросам усовершенствования композиции сплавов, а также перспективным технологиям их литья и деформации.

В данном обзоре подробнее будут рассмотрены некоторые из наиболее интересных докладов, представленных по обоим направлениям.

В докладе авторов В.С. Моисеева, Б.Л. Бобрышева, О.В. Кошелева и др. (МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского) представлены результаты разработки и применения наукоемкой технологии для изготовления крупногабаритных фасонных

отливок из магниевых сплавов (рис. 1). Ими подготовлен пакет прикладных программ, включающий методику расчета температуры заливки расплава в форму, расчет технологического напуска на протяженных элементах отливки, расчетное распределение температур расплава в отливке в процессе ее затвердевания и т. п. Разработанная технология позволяет достичь ряда преимуществ по сравнению с известной технологией: сократить время на подготовку производства вследствие принятия расчетно-обоснованных технологических решений; уменьшить металлоемкость литых заготовок за счет снижения технологических напусков; повысить механические характеристики изделий (предел прочности (σ_b) и относительное удлинение (δ)) не менее чем на 15–20% и, как следствие, улучшить их эксплуатационные свойства, снизить энергетические затраты, естественные потери дорогостоящих легирующих элементов на 40–50%; повысить коррозионную стойкость и экологическую безопасность.

В докладе А.В. Колтыгина Совершенствование литейных магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn» (НИТУ «МИСиС») рассмотрены пути преодоления повышенной склонности отливок к образованию таких дефектов, как микропористость, газовая и газоусадочная пористость, трещины при затрудненной усадке, загрязненность оксидными пленками сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn (отечественный сплав марки МЛ15 – зарубежный аналог AZ91). Автор также полагает, что повышение температуры возгорания на воздухе является сейчас одним из многих направлений, по которому совершенствуются

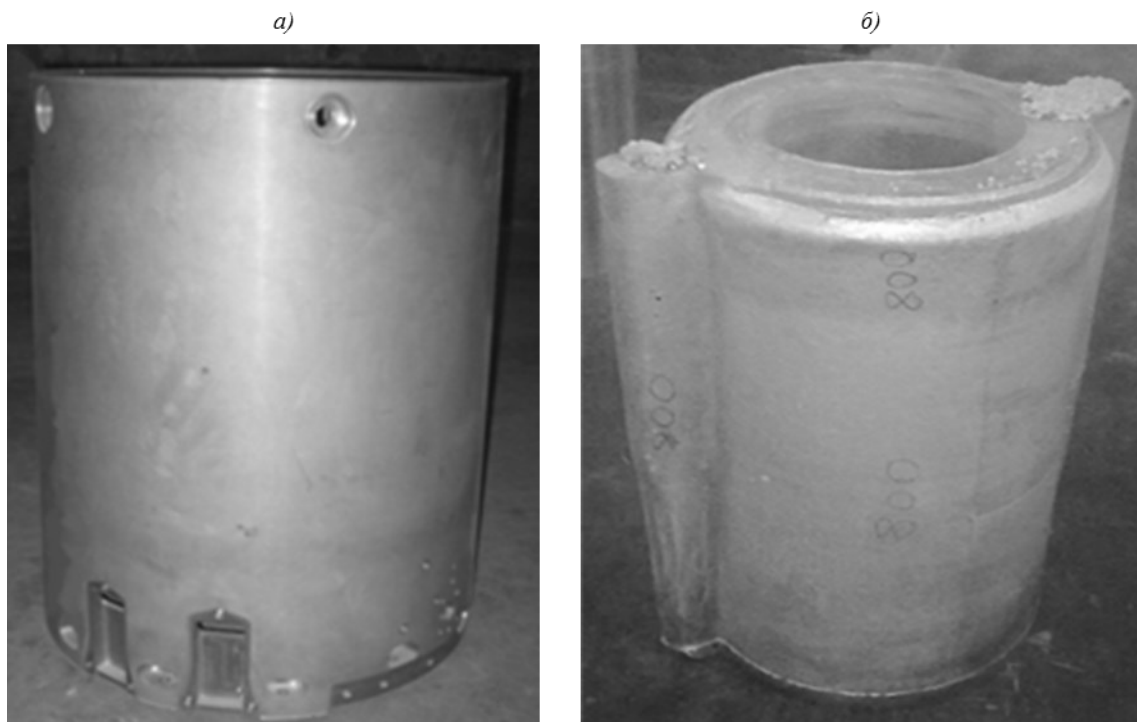


Рис. 1. Внешний вид детали «Корпус отсека» (а) и отливки «Корпус отсека» (б)

магниевого сплава. В качестве эффективного элемента, который может повысить сопротивляемость жидкого магниевого сплава к окислению, может служить кальций. Однако существует ряд сложностей, возникающих при введении кальция в магниевые сплавы: возможно снижение механических свойств магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn при его концентрации 0,3–0,5% (по массе). Кальций отрицательно влияет на термообрабатываемость литых магниевых сплавов данной системы, замедляя процесс растворения интерметаллидной фазы при гомогенизационном отжиге. Причина такого влияния кальция при введении его в магниевые сплавы системы Mg–Al–Zn недостаточно изучена. В работе автор рассмотрел поведение кальция в литом и термообработанном сплаве МЛ15п.ч. (аналог AZ91).

Автор доказывает, используя расчет по неравновесной модели Шейла, проведенный для сплавов, содержащих кальций и без него, что добавка кальция уменьшает неравновесный интервал кристаллизации. В сплаве с кальцием наблюдается образование соединения переменного состава, примерную формулу которого можно записать как $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$, имеющего решетку типа MgZn_2 . При неравновесной кристаллизации фаза, обогащенная кальцием, выделяется из расплава после

почти полной кристаллизации твердого раствора на основе магния по его границам вместе с соединением $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Неравновесная фаза $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$ отличается от равновесной фазы Al_2Ca и переходит в нее в процессе последующей термообработки.

По результатам исследования при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) структуры сплава в чистом виде и с добавкой 0,4% (по массе) Ca в литом и термообработанном состоянии обнаружен эффект модифицирующего действия кальция. Этот эффект наряду с образованием зародышей гидридов при кристаллизации сплава можно объяснить выделением частиц Al_2Ca , образующихся в сплаве в процессе его кристаллизации (рис. 2). Таким образом, сплавы системы Mg–Al–Zn–Mn, содержащие небольшое количество кальция (~0,5% (по массе)), имеют более мелкое зерно по сравнению со сплавами такого же состава без кальция.

Мелкозернистая структура благоприятно сказывается на механических свойствах получаемых литых изделий, а большое количество ультрадисперсных тугоплавких частиц Al_2Ca способствует увеличению жаропрочности сплава [5, 6]. Автором также установлено, что малые добавки кальция незначительно понижают температуру равновесного солидуса и несколько расширяют температурный интер-

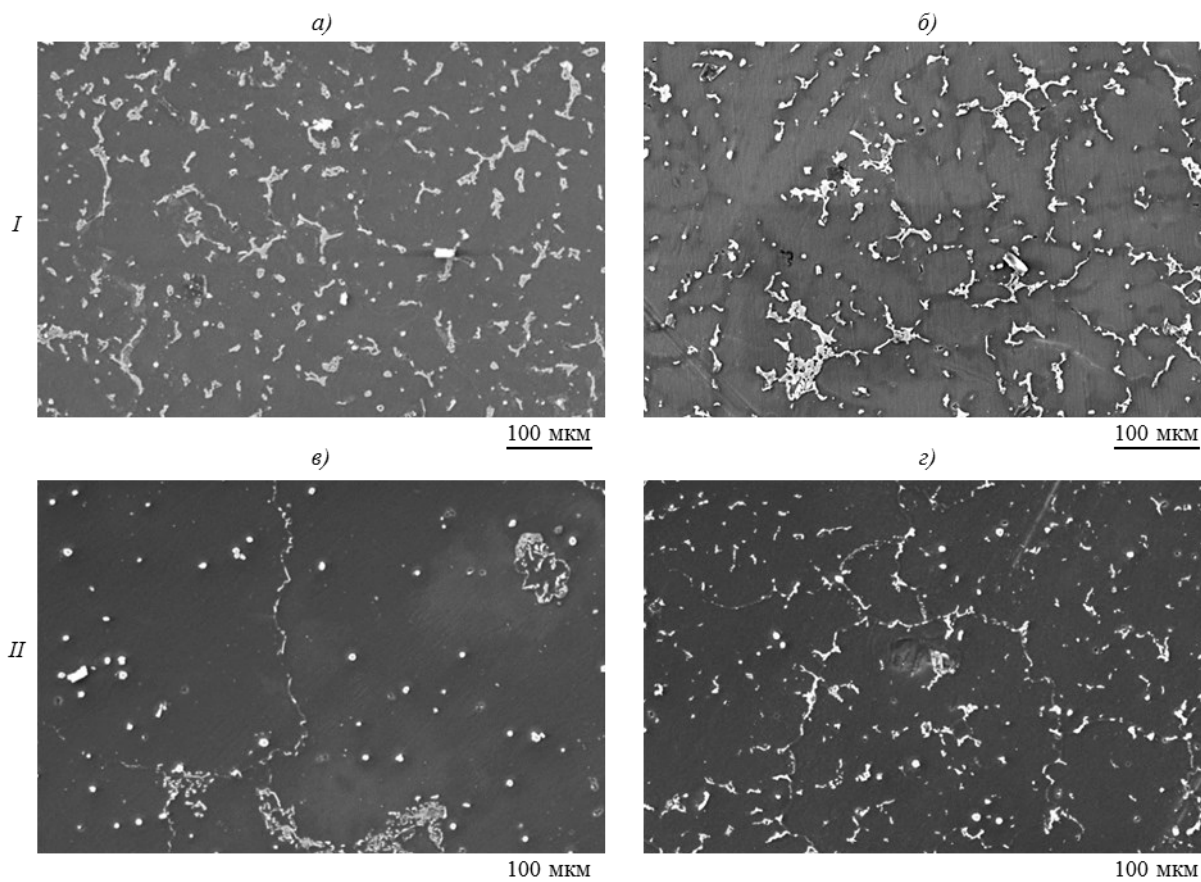


Рис. 2. Микроструктура (СЭМ) сплава МЛ15 в литом (I) и термообработанном состояниях (II), содержащего добавку кальция (б, з) и без нее (а, в)

вал кристаллизации сплавов типа MJ15, а выделение фазы Al_2Ca тормозит рост зерен твердого раствора в процессе термообработки, т. е. являются ответственными за модифицирующий эффект в сплаве.

В области деформируемых магниевых сплавов тематика докладов была достаточно разнообразной. Рассмотрены вопросы влияния легирования и деформации на структурные, фазовые изменения и уровень основных свойств сплавов.

В докладе «Механизмы деформации в $Mg-Zn-Zr$ сплаве и повышение его усталостных характеристик путем измельчения структуры» А. Виноградовым исследован механизм деформации сплава ZK60 (отечественный аналог – сплав MA14) при интенсивной пластической деформации (ИПД) и в процессе равноканального углового прессования (РКУП). Сделана попытка оценить воздействие деформации на изменения зеренной структуры, текстуры, усталостных характеристик и механических свойств сплава при растяжении. Следует отметить, что изменения, происходящие при деформации металлических сплавов, в частности, сплава системы $Mg-Zn-Zr$ (например, MA14), ранее достаточно широко исследованы специалистами ВИАМ [7–9].

Безусловный интерес представляют изложенные в докладе результаты изучения на микроскопическом уровне механизмов пластической деформации и структурных изменений в сплаве в режиме реального времени с помощью использования прибора, действующего на основе явления акустического излучения (Acoustic Emission – AE tool) в процессе ИПД и РКУП. Исследование поведения сплава при деформации с помощью АЕ-прибора позволяет обнаружить различия между определенными стадиями деформации, протекающими в сплавах с различным размером зерна, которые могут быть соотнесены с дислокационным скольжением и двойникованием.

Автором получены четыре метровых прутка из сплава ZK60 методами ИПД и РКУП. Показано, что усталостные характеристики и статические механические свойства при растяжении этих полуфабрикатов повышаются вследствие применения указанных технологий. Как дислокационное скольжение, так и двойникование полностью задействованы в процессе деформации. Однако их относительный вклад зависит от величины зерна и направления приложенной нагрузки. Интенсивная пластическая деформация изменяет барьеры активации дислокационного скольжения благодаря комбинированному эффекту измельчения зерна, изменению текстуры и выделению нанодисперсных частиц.

Исследователь из КНР Xiaodong Peng в своем докладе «Влияние характеристик прессования на микроструктуру и механические свойства $Mg-Li-Al-Sr$ сплава» («Influence of extrusion parameter on microstructure and mechanical properties of $Mg-Li-Al-Sr$ alloy») (College of Materials Sci-

ence and Engineering, National Engineering Research Center of Magnesium Alloys Chongqing University) рассмотрел на конкретном примере сплава $Mg-9Li-3Al-2,5Sr$ (LAJ932) структурные изменения и, соответственно, изменения основных механических характеристик в зависимости от параметров прессования. Им установлено, что в структуре сплава как в литом состоянии, так и после прессования содержится дуплекс-фаза ($\alpha-Mg+\beta-Li$), а также соединение Al_4Sr (рис. 3). Автором подтверждены основные закономерности: с увеличением содержания Sr предел прочности сплава LAJ932- xSr (где x – различное содержание стронция, % (по массе)) в литом и прессованном состояниях вначале возрастает, а затем снижается, сопровождаясь монотонным уменьшением относительного удлинения. После прессования сплав LAJ932 ($Mg-9Li-3Al-2,5Sr$) обладает наиболее благоприятным соотношением прочности и пластичности ($\sigma_B=235$ МПа, $\sigma_{0,2}=221$ МПа, $\delta=19,4\%$).

Изменяя параметры деформации, можно значительно влиять на структуру и механические свойства сплава LAJ932: с ростом температуры деформации размер зерна и относительное удлинение возрастают, а предел прочности снижается; при повышении скорости деформации предел прочности сплава уменьшается, а относительное удлинение увеличивается.

Докладчик объяснил такую зависимость фазовыми изменениями, происходящими в процессе деформации сплава.

В докладе «Исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств $Mg-P3Э-Zn-xMn$ сплавов» («A study of microstructure, phase composition and mechanical properties of $Mg-RE-Zn-xMn$ alloys») авторов из КНР Yaobo Hu, Yani Li, Fusheng Pan (College of materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, National Engineering Research Center for Magnesium Alloys) рассмотрена серия сплавов указанной системы при варьировании концентрации марганца и приблизительно постоянном содержании гадолиния и иттрия (табл. 1).

Исследования фазового состава сплава (рис. 4) позволили констатировать, что в литом состоянии наряду с α -твердым раствором на основе магния присутствует эвтектическая составляющая $Mg_{24}(Y, Gd \text{ и } Zn)_5$, а также вторичная фаза серого цвета $Mg_{12}Zn$ (Y, Gd). Эти результаты коррелируют с данными, полученными отечественными исследователями для сплавов на основе системы $Mg-Zn-Zr-Y$ [10, 11].

Методы исследования тонкой структуры, изложенные в докладе, также хорошо зарекомендовали себя в отечественных разработках [12].

Авторами исследованы структура, фазовый состав и основные механические свойства магниевого сплава при следующем содержании легирующих элементов, % (по массе): $10Gd-6Y-1,6Zn-xMn$, где

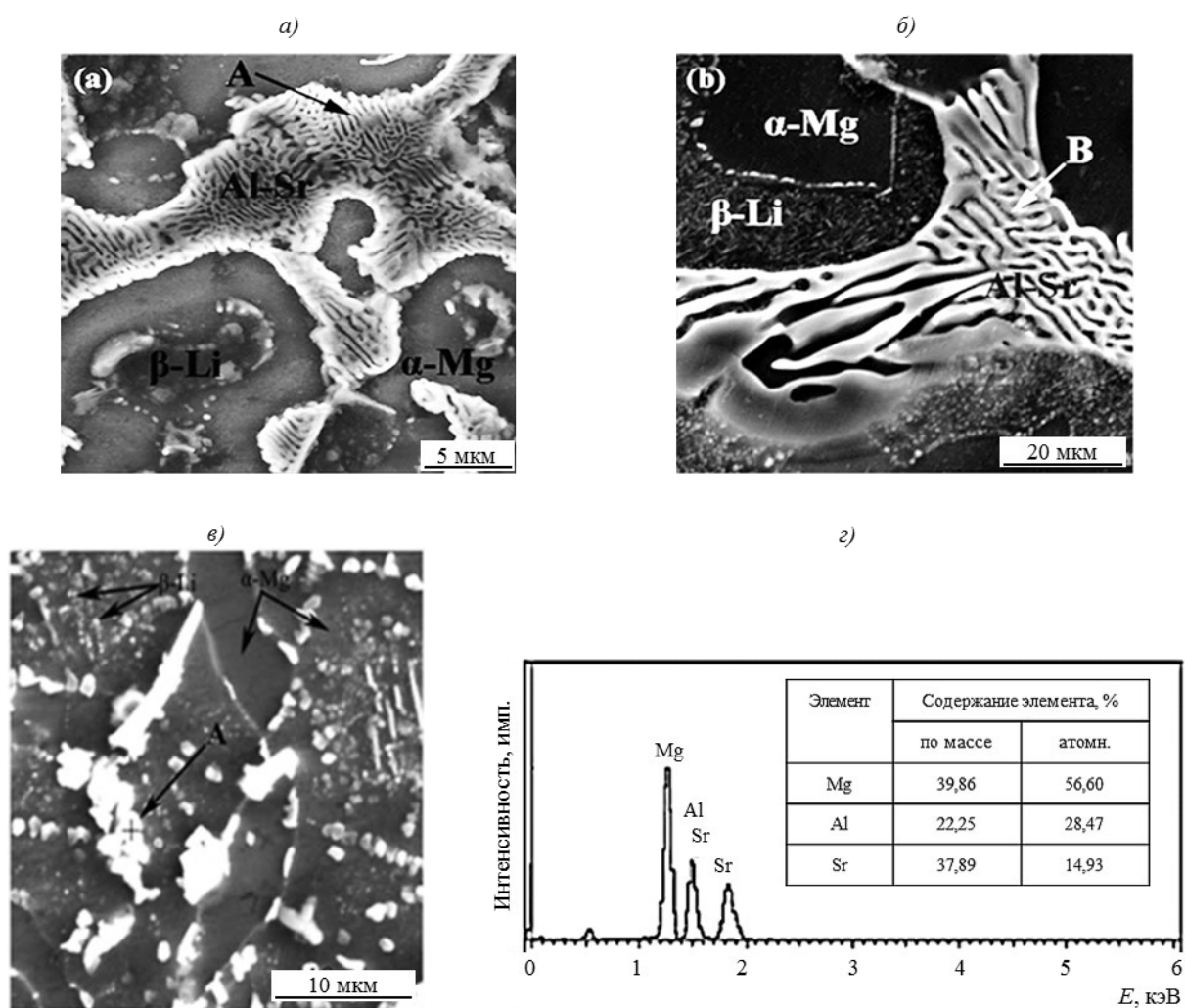


Рис. 3. Микроструктура (СЭМ) слитков диаметром 10 (а) и 90 мм (б) из сплава LAJ932 в исходном состоянии и после прессования (в), результаты микроанализа (г)

Таблица 1

Химический состав экспериментальных композиций сплава системы Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-xMn

Условная марка сплава	Система легирования (расчетный состав)	Химический состав, % (по массе)				
		Mg	Gd	Y	Zn	Mn
GM0	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn	Основа	10,31	6,41	1,68	0
GM1	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-0,4Mn	Основа	10,1	6,61	1,61	0,43
GM2	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-0,8Mn	Основа	10,44	6,44	1,57	0,80
GM3	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-1,2Mn	Основа	10,5	6,52	1,63	1,25
GM4	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-1,6Mn	Основа	10,2	6,50	1,71	1,66
GM5	Mg-10Gd-6Y-1,6Zn-2Mn	Основа	10,71	6,49	1,76	2,23

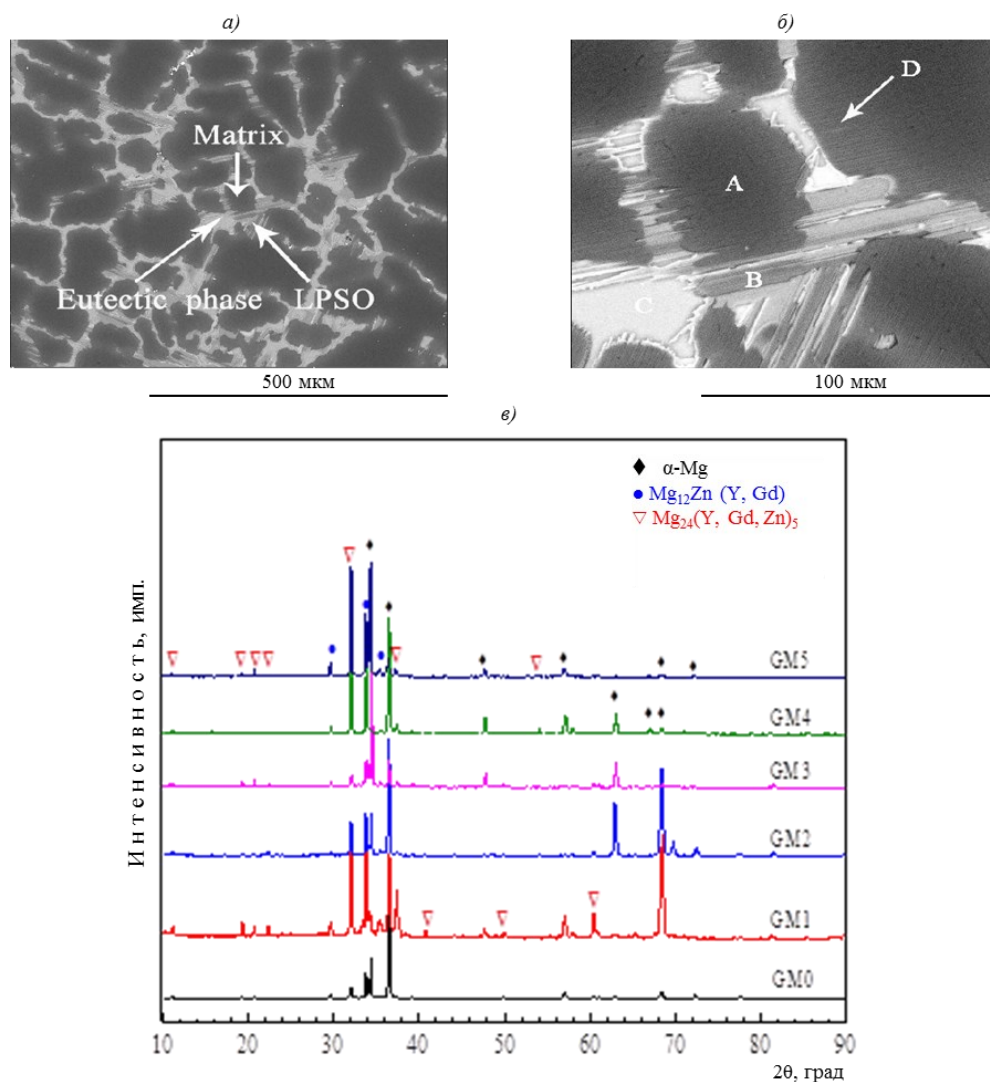


Рис. 4. Микроструктура (СЭМ) образцов из сплава системы Mg–10Gd–6Y–1,6Zn–xMn в литом состоянии (а, б) и спектрограммы выделенных на шлифах участков (в)

$x=0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2$. Установлено, что основные интерметаллидные фазы в литом состоянии следующие: $Mg_{12}Zn(Y, Gd)$, $Mg_{24}(Y, Gd, Zn)_5$, имеются включения частиц α -Mn.

В названном докладе также показано, что после прессования фаза $Mg_{24}(Y, Gd, Zn)_5$ преобразуется в соединение $Mg_{12}Zn(Y, Gd)$, частицы Mn распределяются по границам зерен и внедряются во вторичные фазы.

На сплаве Mg–10Gd–6Y–1,6Zn–0,8Mn получены достаточно высокие механические свойства (состав GM2, табл. 1 и 2). В сплаве Mg–10Gd–6Y–1,6Zn–2Mn (состав GM5, табл. 1 и 2) формируется большое количество вторичной фазы $Mg_{24}(Y, Gd, Zn)_5$, что вызывает снижение уровня прочностных и пластических свойств.

В докладе «Новый магниевый деформируемый сплав для изделий авиакосмической техники» доктора технических наук Е.Ф. Волковой (ФГУП «ВИАМ») подтверждено, что в ВИАМ с 1970-х гг.

проводятся систематические исследования магниевых сплавов, легированных редкоземельными металлами (РЗМ). Разработано свыше 10 марок магниевых сплавов, содержащих РЗЭ, такие как Y, Nd, La, Ce, Gd, Dy.

В последние годы внимание исследователей сосредоточено на совершенствовании композиций новых деформируемых магниевых сплавов и на разработке современных технологий производства деформированных полуфабрикатов. Рассмотрены металлургические основы дальнейшего развития сплавов базовой системы Mg–Zn–Zr при дополнительном легировании различными РЗЭ в новых сочетаниях.

На основании многолетних исследований в области изыскания новых магниевых сплавов, а также с учетом выявленных закономерностей влияния РЗЭ на структуру и свойства сплавов, в ВИАМ разработан перспективный деформируемый

Таблица 2

Механические свойства сплавов системы Mg–10Gd–6Y–1,6Zn–xMn
(в прессованном состоянии)

Условная марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
GM0	380	252	7
GM1	376	301	4
GM2	396	345	10
GM3	380	302	8
GM4	391	342	6
GM5	353	291	4

сплав системы Mg–Zn–Zr–PЗМ (ВМД16) с повышенными эксплуатационными характеристиками. Сплав ВМД16 отличается высоким уровнем прочностных свойств при температурах до 300–350°C и превосходит известные серийные сплавы-аналоги (рис. 5). Новый сплав превосходит серийные аналоги по значениям предела прочности в 1,5–1,8 раз. Результаты проведенного исследования влияния длительных нагревов (10 ч) при повышенных температурах (150 и 200°C) на уровень свойств подтверждают, что значения основных характеристик сплава отличаются стабильностью (табл. 3). Сплав ВМД16 имеет преимущества по сравнению с аналогами по малоцикловой усталости и значению удельной прочности.

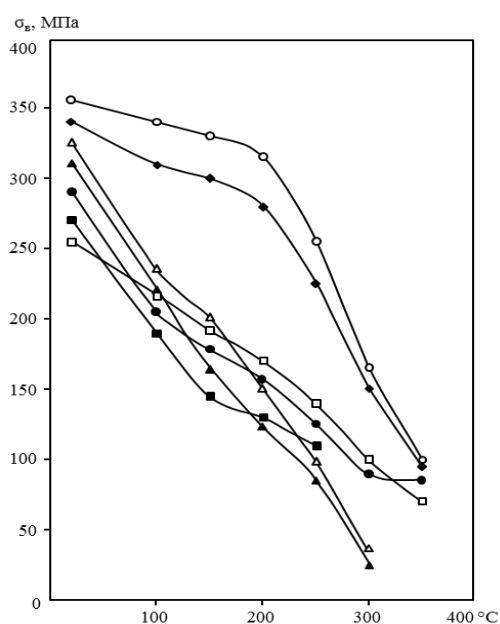


Рис. 5. Зависимость величины предела прочности деформируемых магниевых сплавов от температуры испытания: ● – НК31А (Mg–Th–Zr); ○ – ВМД16 (Mg–Zn–Zr–RE); Δ – MA14 (ZK60A) (Mg–Zn–Zr); ▲ – MA5 (ZK80A) (Mg–Al–Zn–Mn); ■ – MA8 (Mg–Mn–Ce); □ – MA12 (Mg–Nd–Zr); ◆ – MA22 (Mg–Zn–Zr–RE)

Высокий уровень свойств сплава ВМД16 объясняется сбалансированным легированием, в том

числе РЗЭ, что приводит к образованию специфического фазового состава и мелкозернистой структуры. Особенности топологии и морфологии интерметаллидных фаз $ZrZn_2$, Zr_3Zn_2 , мелкозернистая и термостабильная структура имеют особую значимость для достижения повышенных механических характеристик сплава.

Несомненный интерес вызвал доклад авторов Б.В. Овсянникова, А.В. Пономарева, Н.Д. Шанина «Полуфабрикаты из новых конструкционных материалов на основе гранулированных магниевых сплавов» (ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», ООО «НПП „МЕТАГРАН“»). По их мнению, большим преимуществом является возможность изготавливать прессованные полуфабрикаты и изделия из гранулированных магниевых сплавов не только с повышенными прочностными характеристиками, но и химическим составом согласно спецификации потребителей, стандартам ASTM, DIN и другим, а также международным стандартам EN и ISO.

Деформированные полуфабрикаты из высокопрочных гранулированных магниевых сплавов по абсолютным значениям прочностных характеристик соответствуют полуфабрикатам из деформируемых алюминиевых сплавов, превосходя их по удельным значениям этих параметров в 1,4–1,6 раза.

Простая технология изготовления прессованных полуфабрикатов и хорошая свариваемость материалов на основе магния позволяют широко использовать их при изготовлении изделий для машиностроительной отрасли, автомобильной промышленности, спортивного инвентаря и товаров народного потребления, для которых требуется сочетание низкой массы и высоких прочностных характеристик.

Дальнейшее совершенствование гранулирования и внедрение его в промышленность будет способствовать увеличению производства новых видов изделий, отвечающих современным требованиям.

Ряд исследований посвящен проблеме антикоррозионной защиты магниевых сплавов (направление – коррозия и окончательная защитная отделка сплавов).

В частности, доклад авторов Ю.И. Кузнецова, А.М. Семилетова, А.А. Чиркунова, О.А. Гончаровой «Противокоррозионная защита магния нано- и

Таблица 3

Механические свойства сплава ВМД16

Свойства	Значения свойств		
	в исходном состоянии	после длительной выдержки (10 ч) при температурах нагрева, °С	
		150	200
Предел прочности, МПа	$\frac{345-356^*}{350}$	$\frac{336-345}{340}$	$\frac{330-345}{337,5}$
Предел текучести, МПа	$\frac{248-255}{250}$	$\frac{250-265}{257,5}$	$\frac{240-265}{252,5}$
Относительное удлинение, % (при $l_0=10d_0$)	$\frac{12-14}{13}$	$\frac{11-17}{14}$	$\frac{9,5-17,5}{13,5}$
Относительное сужение, %	$\frac{24-28}{26}$	$\frac{10-20}{15}$	$\frac{15-27,5}{21,25}$
Модуль упругости, ГПа	$\frac{46-47}{46,5}$	$\frac{41-45}{43}$	$\frac{41-45}{43}$

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние (по результатам испытаний 3–5 стандартных образцов).

микроноразмерными покрытиями» (Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН) содержит предложения по применению нетоксичных органических ингибиторов коррозии вместо экологически опасных хроматов как для кратковременной защиты магния и его сплавов, так и для транспортировки и длительного хранения изделий и полуфабрикатов. Представлен разработанный ингибитор коррозии магния под условным названием – ИФХАН-Mg, который существенно эффективней токсичного хромата, хотя он и не обладает окислительными свойствами. Этот ингибитор может быть использован в виде водного раствора для пассивации сплавов Mg, а также для повышения защитных свойств восковых составов и полимерных покрытий. Для защиты Mg и его сплавов может быть также использован летучий ингибитор коррозии ИФХАН-118 или его модификация, применимая в случае необходимости защиты их без оксидного покрытия.

В докладе специалистов из Израиля Galit Levy и проф. Eli Aghion (Отделение материаловедческого инжиниринга Университета Бен Гуриона) «Диффузионная поверхностная обработка как метод продления жизненного цикла магниевых биodeградирующих имплантатов» («Diffusion Coating Treatment as a Method to Prolong the Life Span of Biodegradable Magnesium Implants») рас-

смотрены возможности повышения характеристик сплава-имплантата системы Mg–1,2Nd–0,5Y–0,5Zr–0,4Ca путем применения диффузионной поверхностной обработки при использовании Nd в качестве предварительного наружного покрытия перед термической обработкой.

Диффузионная поверхностная обработка при помощи Nd повышает коррозионное сопротивление и увеличивает жизненный цикл сплава системы легирования Mg–1,2Nd–0,5Y–0,5Zr–0,4Ca в условиях, симулирующих физиологическую среду. Улучшение коррозионного поведения этого сплава может быть объяснено положительным эффектом от воздействия Nd благодаря формированию вторичной фазы $Mg_{41}Nd_5$ и оксидной пленки Nd_2O_3 .

Итоги конференции подтвердили наличие устойчивой тенденции в области расширения исследования новых сплавов на основе магния с применением РЗЭ, ведущая роль которых ранее была отражена в работах ученых ВИАМ [13–15].

Подтверждено, что введение РЗЭ при различном их соотношении в магниевые сплавы позволяет получать самый широкий спектр значений не только механических характеристик, но также технологических свойств сплавов на магниевой основе. Использование РЗЭ в защитных покрытиях способствует повышению их антикоррозионных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1(34). С. 3–33.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 212–222.
4. Николас А., Рольник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // Аэрокосмический курьер. 2011. №1. С. 42–44.

-
5. Koltygin A.V., Bazlova T.A., Plisetskaya I.V. Effect of calcium on the process of production and structure of magnesium melted by flux-free method // *Metal Science and Heat Treatment*. 2013. V. 54. №9–10. P. 540–544.
 6. Peng Zhou, H.R. Gong. Phase stability, mechanical property and electronic structure of an Mg–Ca system // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. V. 8. P. 154–164.
 7. Волкова Е.Ф., Антипов В.В., Морозова Г.И. Особенности формирования структуры и фазового состава деформированных полуфабрикатов серийного сплава МА14 // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 8–15.
 8. Волкова Е.Ф., Исходжанова И.В., Тарасенко Л.В. Структурные изменения в магниевом сплаве МА14 под воздействием технологических факторов // *МиТОМ*. 2010. №12. С. 19–23.
 9. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 141–147.
 10. 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 Mater*. 2010. V. 58. №14. P. 4760–4771.
 11. Volkova E.F. Some Regular Features of Formation of Phase Composition in a Magnesium Alloy of the Mg–Zn–Zr–Y System // *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. V. 55. №9–10. P. 477–482.
 12. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.09.2014).
 13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.К. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.09.2014).
 14. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
 15. Бецофен С.Я., Волкова Е.Ф., Колобов Ю.Р., Луценко А.Н. Исследование текстуры и анизотропии механических свойств сплавов магния с РЗМ // *Технология легких сплавов*. 2012. №1. С. 31–38.
-