

УДК 669.018.8

И.Ю. Мухина¹, З.П. Уридия¹, Н.В. Трофимов¹

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23

Рассмотрены коррозионностойкие литейные магниевые системы Mg–Al–Zn–Mn, а также исследовано влияние температуры и времени выстаивания на загрязнение расплава железом.

Исследование влияния технологии плавки и фазового состава на коррозионную стойкость и механические свойства литейных магниевых сплавов – актуальная задача, решение которой обеспечивает повышение качества магниевых отливок. Исследованы причины питтинговой коррозии деталей из сплава МЛ5п.ч. промышленной плавки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: магниевые сплавы, легирование, механические свойства, микроструктура, предел прочности, предел текучести.

The article deals with corrosion-resistant casting magnesium alloys of system Mg–Al–Zn–Mn. The effect of temperature and exposure time of the melt for the iron contamination is studied.

Investigation of the effect of melting technology and phase composition on the corrosion resistance and mechanical properties of magnesium alloys casting is an actual task, which solution enhances the quality of magnesium castings. The causes of pitting corrosion of parts from commercial alloy ML5p.ch. are analyzed.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.10. «Power-efficient, resource-saving and additive manufacturing techniques of deformable semi-finished products and mold castings from magnesium and aluminum alloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: magnesium alloys, alloying, mechanical properties, microstructure, tensile strength, yield strength.

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

Введение

Магниевые сплавы весьма технологичны, их можно отливать всеми способами литья – в песчаную форму и кокиль, под давлением, жидкой штамповкой, под низким давлением, непрерывным и полунепрерывным способами. Малое теплосодержание сплавов позволяет повысить производительность и уменьшить износ инструмента при литье под давлением по сравнению с алюминиевыми сплавами. Детали из магниевых сплавов отлично шлифуются, полируются, подвергаются химическому фрезерованию (травлению), свариваются, а по легкости обработки резанием сплавы превосходят все остальные конструкционные материалы. Часто с магнием связывают опасность пожаров. При применении защитного газа во время плавки, термообработки, сварки, а также специального присадочного материала в формах при заливке магниевого сплава удастся свести опасность возгорания до минимума. Для деталей эта опасность практически отсутствует.

В связи с высокими требованиями к изделиям авиационной, космической, военной и других отраслей промышленности, нужны современные решения, в частности, использование коррозионностойких материалов с высокими прочностными свойствами, которые способны выдержать высокие нагрузки в различных условиях эксплуатации, что позволит продлить срок службы и снизить массу изделий.

Магниевые литейные сплавы относятся к наиболее легким металлургическим материалам, их плотность составляет 1,75–1,85 г/см³, что существенно ниже, чем у других материалов. Достаточно высокая удельная прочность обеспечивает возможность использования магниевых сплавов в качестве конструкционных материалов для производства современной сверхточной техники там, где требуется снижение массы конструкций [1–8].

Разработкой новых магниевых сплавов различных составов и технологии производства литых

изделий из них успешно занимаются ведущие фирмы Китая, Кореи, Англии, Израиля, Японии, США.

Из-за высокой окисляемости магния магниевые сплавы имеют пониженную коррозионную стойкость. При этом они практически не подвергаются межкристаллитной и расслаивающей коррозии, но характеризуются повышенной скоростью общей коррозии и склонны к язвенной коррозии. Поэтому активно ведутся исследования в области установления влияния металлургических, металлургических и технологических факторов на коррозионные свойства, а также разработка на их основе коррозионностойких магниевых сплавов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Основной способ защиты магниевых сплавов – нанесение системы покрытий, состоящей из неметаллического неорганического покрытия (хроматного, фторидно-фосфатного, бифторидного и др.) и лакокрасочных покрытий. Однако чистота сплава по вредным примесям и наличию легирующих элементов, положительно влияющих на матрицу сплава, способы выплавки и технологические параметры обработки расплава представляют интерес для исследований [9–12].

Материалы и методы

Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы предназначены для эксплуатации в условиях нагрева: длительно – до 150°C, кратковременно – до 175°C. К данным сплавам относятся сплавы марок МЛ5п.ч. и ВМЛ18. Эти сплавы имеют пониженное содержание вредных примесей и повышенную коррозионную стойкость. Коррозионная стойкость магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn, на основе которой разработаны промышленный сплав МЛ5п.ч. и новый сплав ВМЛ18, с добавками кальция, кадмия и др. в значительной степени зависит от содержания примесей железа и кремния, а также от технологии плавки [13–16]. Технология плавки сплавов повышенной чистоты отличается от плавки сплавов обычной чистоты. Известно, что примесь железа в количестве >0,017% (по массе) резко ухудшает коррозионную стойкость сплава. Рафинирование расплава от железа и кремния проводили с помощью бесхлоридного флюса ФЛ5-3, а так-

же специальным способом (патент №2188873) [7].

Шихтовыми материалами для приготовления сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18 являлись готовые чушковые сплавы МА8-Цч. (ГОСТ 2581–78) и сплав ВМЛ18 (ТУ1-595-24-1415–2013) с содержанием примесей железа соответственно <0,005% (по массе) – для сплава МЛ5п.ч. и ≤0,004% (по массе) – для сплава ВМЛ18; кремния соответственно 0,04% (по массе) – для сплава МЛ5п.ч. и 0,03% (по массе) – для сплава ВМЛ18. Составной частью шихты также являлись возвраты. Рафинирование при бесфлюсовой плавке осуществляли продувкой расплава аргоном [16–20]. Коррозионную стойкость определяли при испытаниях в 3%-ном растворе NaCl за 48 ч по количеству выделившегося водорода. Химический состав и механические свойства образцов определяли стандартными методами. Микроструктуру сплавов и размер зерен определяли на травленых шлифах на металлографическом микроскопе DM IRM фирмы Leica при увеличениях ×(100–500) [21–24]. Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 (3 мегапикселя), подготовку изображений к количественному анализу и их обработку выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3х. Фазовый состав изучали с помощью дифрактометра D/MAX-2500 фирмы Rigaku в Cu K_α-излучении, расшифровка дифрактограмм выполнена с применением специализированного программного обеспечения и базы данных PDF-2 [25–27].

Результаты

В литейных цехах плавку ведут в железных тиглях и используют возврат собственного производства, который в процессе плавки обогащается примесями Fe и Si. Таким образом, может происходить загрязнение сплава этими примесями. Обогащение жидких магниевых расплавов системы Mg–Al–Zn–Mn железом зависит от температуры и длительности выстаивания магниевых расплава в тигельной печи (табл. 1). Полученные данные показывают, что наибольшее загрязнение железом происходит при температуре выстаивания 780–800°C и продолжительности 60 мин.

При плавке в заводских условиях содержание железа и кремния может достигать до 0,008–0,01 и

Таблица 1

Влияние режима выстаивания расплава в тигельной печи на содержание железа в сплавах ВМЛ18 и МЛ5п.ч.

Сплав	Режим выстаивания		Содержание железа в сплаве, % (по массе)	
	температура, °C	продолжительность, мин	максимальное	минимальное
ВМЛ18	740–750	60	0,003	0,002
	760–770	30	0,005	0,004
МЛ5п.ч.	780–800	15	0,005	0,003
		30	0,006	0,003
		60	0,008–0,01	0,004

0,08% (по массе) соответственно, что превышает необходимый уровень по химическому составу. Химический состав сплавов приведен в табл. 2. Получение сплавов повышенной чистоты по указанным вредным примесям достигнуто специальным способом рафинирования – совместным введением циркония и титана в расплав. Следует иметь в виду, что сохранение достаточно высоких механических свойств и однородной мелкозернистой структуры – сложная задача, так как элементы, повышающие чистоту и коррозионную стойкость, такие как титан и цирконий, могут укрупнять структуру сплава, разупрочняя его. Для того чтобы этого не произошло, необходим поиск новой технологии, строгое соблюдение технологических режимов плавки и количества вводимых элементов.

При рафинировании магниевых сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18 с целью получения необходимой чистоты по примесям цирконий вводили в количествах 0,05; 0,1; 0,2 и 0,3% (по массе) от массы шихты из лигатуры системы Mg–(10–20%)Zr. Установлено, что количество легирующих элементов (Al, Zn, Mn) при этом находится в норме. При введении 0,3% (по массе) Zr требуется дошишковка алюминия ~0,61% (по массе) – до 8,0–8,3% (по массе), ввиду образования соединений циркония с алюминием и высаживания алюминия. Более полная очистка расплава от примесей и эффект повышения коррозионной стойкости с одновременным измельчением зерна имеют место при введении 0,15 и 0,2% (по массе) циркония совместно с титановой губкой.

На коррозионную стойкость магниевых сплавов оказывают влияние не только вредные примеси, но и легирующие компоненты и неметаллические включения, большинство которых попадает в расплав из хлористых флюсов при разливке по формам. Химический состав флюсов представлен в табл. 3. На поверхности отливок неметалличе-

ские включения при соприкосновении с влагой образуют концентрированные растворы, вызывающие активное растворение магниевых сплавов. Флюсовая коррозия снижает надежность эксплуатации, так как включения часто залегают на большой глубине и деталь может разрушиться насквозь. Перспективной является разработка технологии получения коррозионностойкого сплава, в основе которой находится плавка с уменьшенным расходом хлорсодержащих флюсов, использование флюсов марок ФЛ5 и ФЛ5-3, а также бесфлюсовая плавка в защитной атмосфере.

Содержание во флюсе фтористых солей магния и алюминия и уменьшение количества хлористого бария с 5–8 до 3–4% (по массе) обеспечивают резкое снижение в отливках из сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18 флюсовых и шлаковых включений. Флюс, содержащий меньшее количество хлористого бария (наиболее токсичного вещества), экологически более чистый и более безопасный при защите расплава от окисления и рафинирования. Поскольку из магниевых сплавов повышенной чистоты изготавливаются корпусные детали двигателя и детали внутреннего набора планера, а также системы управления, вентиляторы, редукторы и приборы, то, ввиду их ответственности, все детали проходят 100%-ный контроль на флюсовые включения, которые определяются при испытании во влажной камере с относительной влажностью 95–100% в течение 48 ч.

При применении флюса марки ФЛ5 и опытного флюса для сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18 количество шлаковых включений уменьшается в 2,5 раза, загрязнение флюсовыми включениями снижается до 0,3–0,5% (по массе).

Разработанный процесс рафинирования магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn от примесей Fe и Si посредством введения в сплавы микродобавок Zr и Ti позволяет снизить в них содержание примеси железа в 2–3 раза и в 8–10 раз –

Таблица 2

Химический состав сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18

Сплав	Основные элементы, % (по массе)						Примеси, % (по массе)			
	Mg	Al	Zn	Mn	Cd	Ca	Fe	Si	Zr	Ti
МЛ5п.ч.	Основа	7,80	0,55	0,23	–	–	0,007	0,03	0,002	0,001
ВМЛ18		8,20	0,60	0,30	0,3	0,1	0,003	0,017	0,002–0,003	0,001–0,0015

Таблица 3

Химический состав флюсов для плавки сплавов повышенной чистоты

Флюс	Состав флюсов, % (по массе)						
	MgCl	KCl	BaCl ₂	CaF ₂	MgF ₂	AlF ₂	Сумма примесей MgO+CaCl ₂ +NaCl
Бариевый №2	40	34–43	6–9	–	–	–	Остальное
ВИ-2	38–46	32–40	5–8	3–5	–	–	
ФЛ5-3	32–42	27–37	5–8	6–10	–	6–10	
Опытный	36–44	30–38	3–4	–	2–3	5–8	

примеси кремния (по сравнению с содержанием по ГОСТ 2856–79). В табл. 4 приведены средние значения коррозионной стойкости промышленных образцов.

Механические свойства сплавов представлены в табл. 5.

Выплавленные сплавы имеют однородную мелкозернистую структуру и хорошие механические свойства, превышающие уровень свойств по ГОСТ 2856–79 для сплава МЛ5п.ч.-Т4 ($\sigma_b=235$ МПа, $\sigma_{0,2}=90$ МПа, $\delta=5\%$). На рис. 1 и 2 представлены микроструктуры сплавов.

Исследование фазового состава сплава ВМЛ18, содержащего малые добавки кадмия и кальция в закаленном состоянии (режим Т4), проведено на образцах заводской плавки с условными номерами 3 и 5, а также лабораторной плавки – образец 6. Коррозионная стойкость выплавленного сплава высокая и соответствует техническим требованиям. На рис. 3 представлены результаты исследования с помощью дифрактограмм, расшифровка которых показала, что в сплаве ВМЛ18 заводской плавки (образцы 3 и 5) обнаружены интерметаллидные фазы Al_6Mn и Al_8Mn_5 . Аналогичен фазовый состав образца 6 лабораторной плавки. Во всех образцах из сплава ВМЛ18 присутствуют неметаллические включения в виде оксидов марганца – MnO_2 и Mn_3O_4 . Фазы, содержащие железо, отсутствуют.

Микроструктура сплава ВМЛ18 в литом состоянии мелкокристаллическая, равноосная с выраженной псевдоэвтектикой, расположенной по границам зерен. Эвтектика состоит из крупных образований (α -твердого раствора Al , Zn , Cd в магнии+соединения $Mg_{17}Al_{12}$), прерывисто декорирующих границы литого зерна. В соединении $Mg_{17}Al_{12}$ при большом увеличении ($\times 500$) видны беспорядочно расположенные включения серого цвета элементарного марганца – α -Mn и (или) β -Mn (система $Mn-Fe$). Обе фазы ответственны за коррозионную стойкость сплава.

При закалке при температуре $415\pm 5^\circ C$ в течение 14 ч (с охлаждением на воздухе) соединение $Mg_{17}Al_{12}$ переходит в твердый раствор, упрочняя его. Кадмий, кальций и частично марганец в сплаве ВМЛ18 входят в состав твердого раствора,

упрочняя его. Кроме того, марганец образует одну или несколько фаз – $MnAl$ (τ -фаза) и Mn_5Al_8 (η -фаза), расположенных внутри зерна или по его границам (рис. 4).

Как указывалось ранее, примесь железа (в качестве дополнительного катода) отрицательно влияет на коррозионную стойкость магния и его сплавов. В ряде случаев, при неблагоприятных условиях технологического процесса и дополнительных загрязнениях (например, со стороны тигля), железо связывается в фазы $FeAl$ и Fe_2Al_5 . Введение марганца подавляет образование этих катодных фаз – возникают соединения $MnAlFe$ (τ -фаза) и $MnFe$ (β -Mn). С точки зрения металлургии это означает осаждение железа в процессе плавки. В сплавах системы $Mg-Al-Zn-Mn$ также повсеместно имеется соединение α -Mn – элементарный марганец. К отрицательному эффекту (охрупчивание, снижение предела текучести) приводит загрязнение расплава кремнием и появление кремниевых кристаллов соединения Mg_2Si остроугольной или разветвленной формы, представленных на рис. 5. Кремний может попадать в расплав из стержневой смеси или недостаточно очищенных возвратов, применяемых в шихте.

Представляло интерес исследовать фазовый состав сплавов заводских плавов в термообработанном состоянии по режиму Т4 со следами питтинговой коррозии и без коррозии. Методом изолирования фаз [15] установлено, что основной упрочняющей фазой сплавов ВМЛ18 и МЛ5 является фаза $Mg_{17}Al_{12}$. Цинк входит в состав фазы $Mg_{17}Al_{12}$, замещая атомы магния и алюминия, тогда соединение может быть представлено в виде $(MgZn)_{17}(AlZn)_{12}$.

На рис. 6 представлена дифрактограмма фазового состава сплава МЛ5п.ч., загрязненного примесью железа со следами питтинговой коррозии, которая вызвана присутствием элементарного железа (α -Fe) и соединений Al_5Fe_2 и $Al_{82}Fe_{18}$.

Исходя из вышеизложенного, для выплавки коррозионностойкого сплава ВМЛ18 с целью его рафинирования и повышения чистоты по содержанию примесей железа и кремния использован специальный технологический прием – введение циркония и титана в расплав. Получение сплавов высокой чи-

Таблица 4

Коррозионная стойкость сплавов МЛ5п.ч., ВМЛ18 и МЛ5 (литое состояние) в 3%-ном растворе NaCl за 48 ч

Сплав	Состояние	Коррозионная стойкость	
		по водородному показателю, cm^3/cm^2	по потере массы, $г/м^2$ в сут
МЛ5п.ч.	Литое Т4	3,8–4,0	5,0
		7,0–8,0	–
ВМЛ18	Литое Т4	1,0–1,5	1,5–1,8
		2,4–2,5	2,4–3,0
Промышленный сплав МЛ5		8,0–16,0	9,0–12,0

Таблица 5

Механические свойства (средние значения) сплавов МЛ5п.ч. и ВМЛ18, рафинированных микродобавками циркония и титана

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
МЛ5п.ч.-Т4	230–235	90	6–7
ВМЛ18-Т4	245–255	95–110	6,5–12

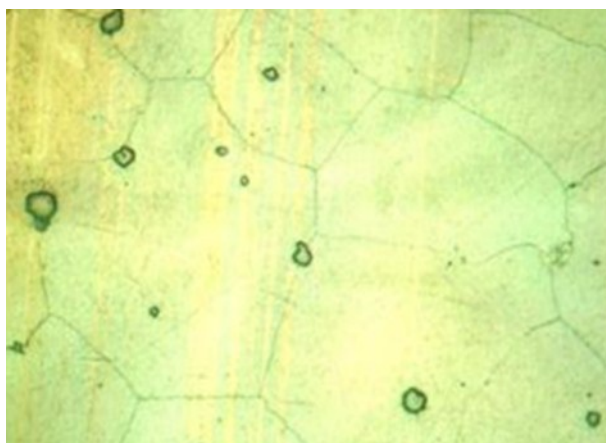


Рис. 1. Микроструктура ($\times 200$) сплава МЛ5п.ч. в закаленном состоянии (Т4)

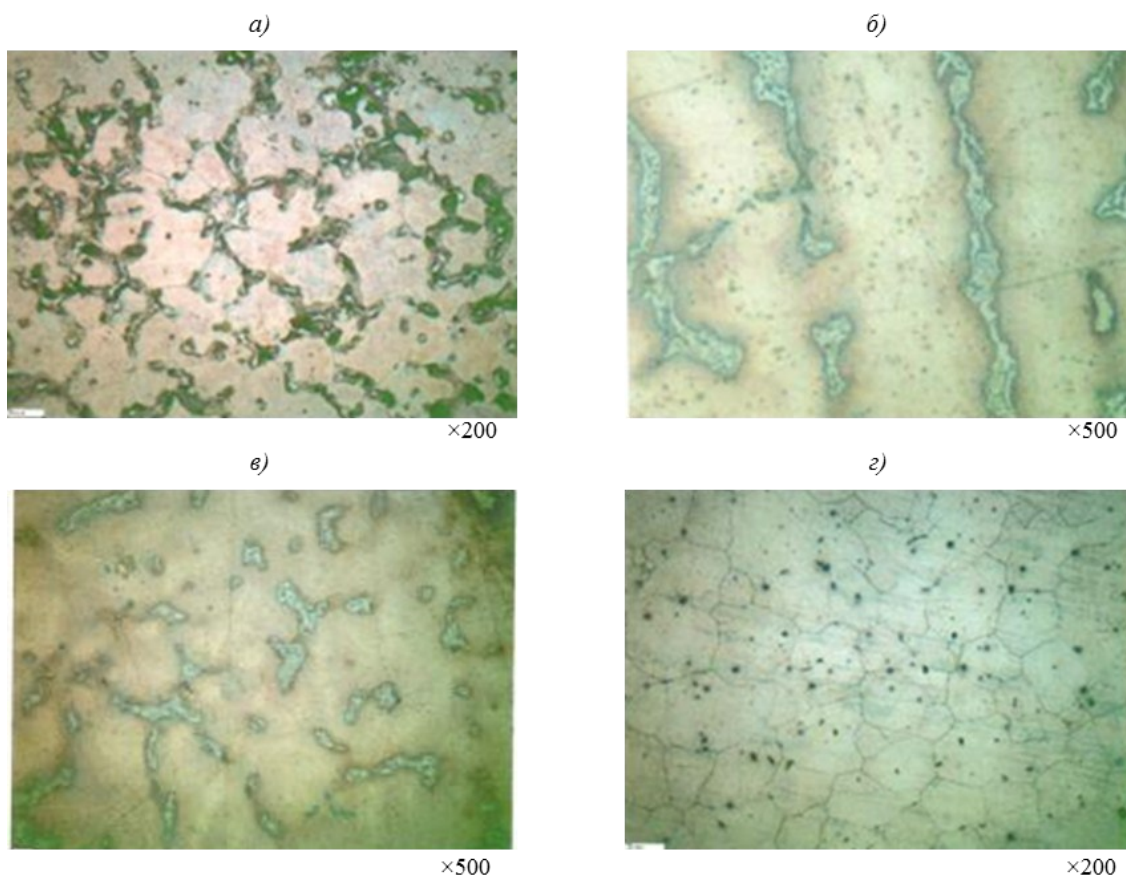


Рис. 2. Микроструктура сплава ВМЛ18 в литом (а–в) и термически обработанном по режиму Т4 (z) состояниях

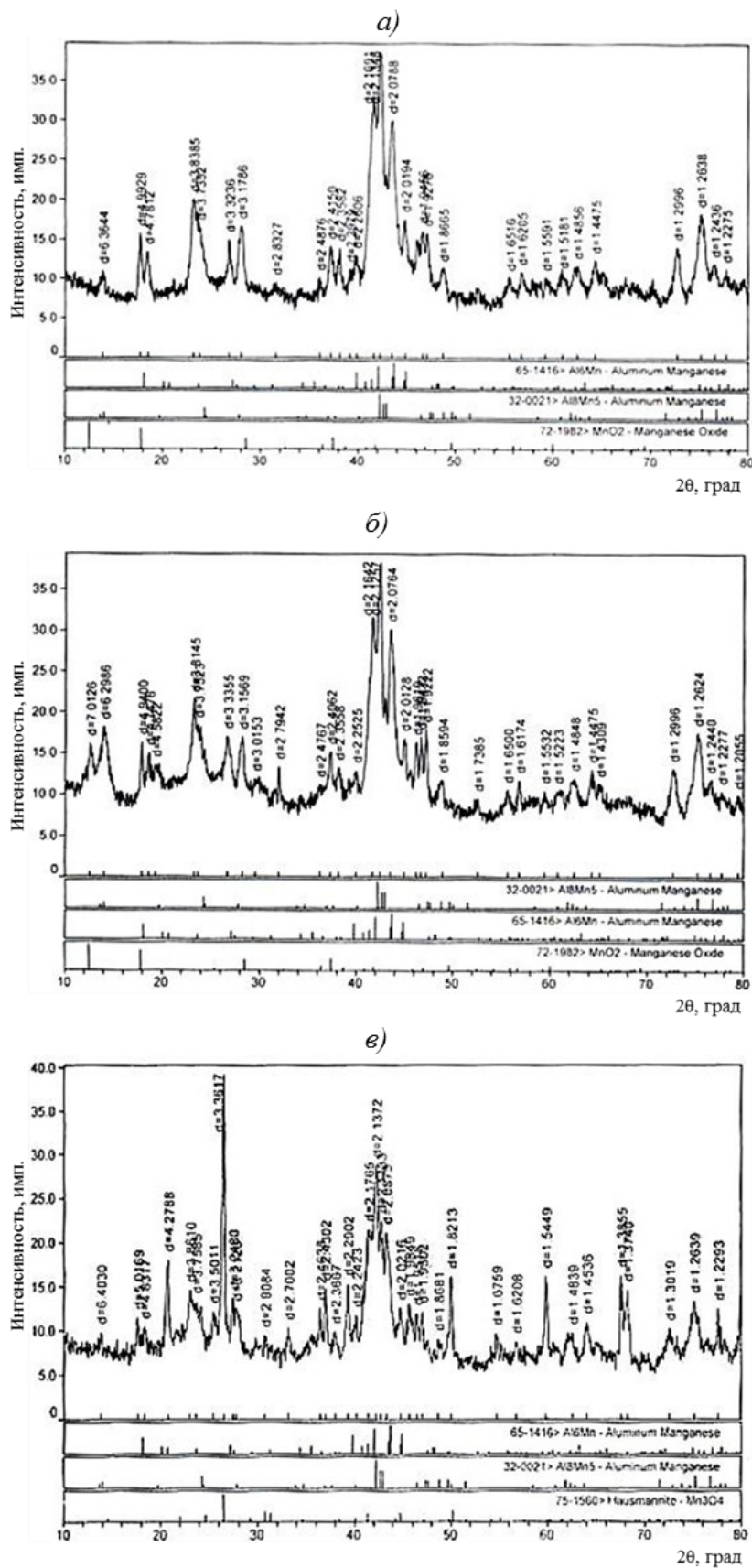


Рис. 3. Дифрактограммы образцов из сплава ВМ18 заводской плавки 3 (а) и 5 (б), а также образца б (в) лабораторной плавки

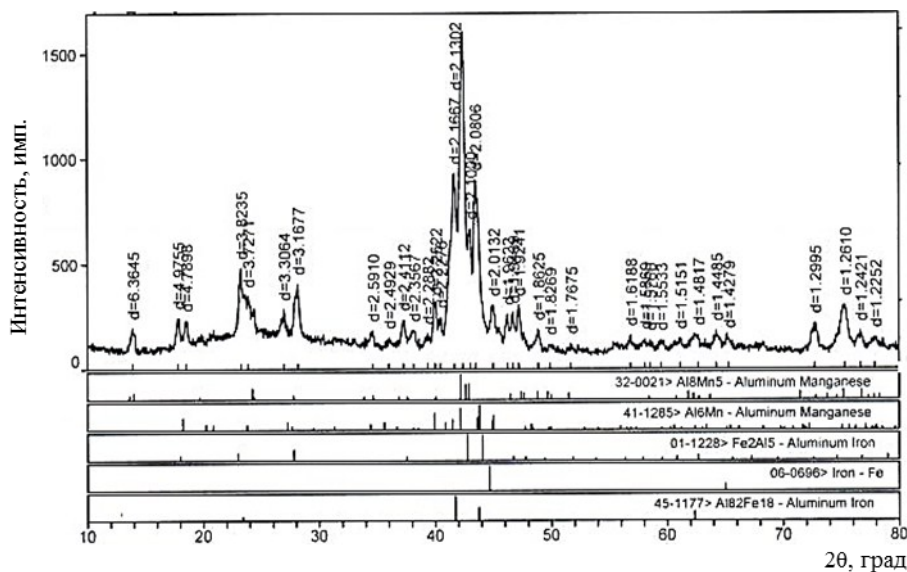
Рис. 4. Фазы η -Mn₅Al₈ (а) и τ -MnAl (б), изолированные из сплава МЛ5п.ч.Рис. 5. Фаза Mg₂Si в промышленной плавке сплава МЛ5п.ч.-Т6 (×500)

Рис. 6. Дифрактограмма сплава МЛ5п.ч.

стоты с сохранением достаточно высоких механических свойств и однородной мелкозернистой структуры – сложная задача, так как элементы, повышающие чистоту и коррозионную стойкость – титан и цирконий, укрупняют структуру сплава, разупрочняя его. Для того чтобы этого не произошло, необходимо строгое соблюдение технологических режимов плавки и количества вводимых элементов.

Благодаря совокупности хороших технологических свойств сплав рекомендуется для про-

мышленного производства нагруженных деталей методом литья в формы из холоднотвердеющей смеси, кокиль и под давлением, работающих в атмосферных условиях с высокой влажностью.

Обсуждение и заключения

Литейные магниевые сплавы системы Mg–Al–Zn–Mn повышенной чистоты марок ВМЛ18 и МЛ5п.ч. наиболее коррозионно устойчивы при работе в условиях естественной атмосферы и всеклиматического варианта (по сравне-

нию с магниевыми сплавами других систем) вследствие присутствия марганца, повышающего перенапряжение водорода, устойчивости основной упрочняющей фазы $Mg_{17}Al_{12}$ и отсутствия катодных фаз с железом и кремнием.

Путем комплексного микролегирования сплава ВМЛ18 титаном и цирконием из лигатур с применением специальных технологических режимов рафинирования и выстаивания при плавке и литье, повышена чистота и коррозионная стой-

кость в сочетании с высокими механическими свойствами: $\sigma_B=245-255$ МПа, $\sigma_{0,2}=95-110$ МПа, $\delta=8-12\%$, коррозионная стойкость $K_c \leq 2,5$ см³/см² (по водороду). Сплав ВМЛ18 превышает по коррозионной стойкости сплавы МЛ5п.ч. и МЛ5 – в 2,5–5 раз. Применение нового литейного сплава ВМЛ18 в изделиях авиационной, космической и оборонной техники обеспечивает снижение материалоемкости и повышение надежности и ресурса магниевых изделий.

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. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 157–167.
4. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 183–195.
5. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 196–206.
6. Мухина И.Ю. Исследование металлических систем на основе магния и разработка принципов создания коррозионностойких магниевых сплавов // *МиТОМ*. 2014. №1. С. 8–12.
7. Сплав на основе магния и изделия, выполненные из него: пат. 2198234 Рос. Федерация; опубл. 10.02.03. Бюл. №4. С. 419.
8. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы // *Литейное производство*. 2013. №5. С. 2–5.
9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 25–31.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. 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: 30.09.2016).
11. Морозова Г.И., Мухина И.Ю. Наноструктурное упрочнение литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr // *МиТОМ*. 2011. №11. С. 3–7.
12. Тимонова М.А. Коррозия и защита магниевых сплавов. М.: Машиностроение, 1964. С. 295–300.
13. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов // *Литейное производство*. 2011. №12. С. 12–14.
14. Способы получения магниевых сплавов: пат. 2188873 Рос. Федерация; опубл. 10.09.02. Бюл. №25. С. 399.
15. Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 28–34.
16. Садков В.В., Лапонов Ю.Л. и др. Перспективные условия применения магниевых сплавов в самолетах ОАО «Туполев» // *Металлургия машиностроения*. 2007. №4. С. 19–23.
17. Мухина И.Ю., Бобрышев Б.Л., Антипов В.В. и др. Структура и свойства сплавов системы Mg–Al–Zr при литье в кокиль и формы из ХТС // *Литейное производство*. 2014. №8. С. 6–10.
18. Горбоджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2016).
19. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнотелурованных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.
20. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Фролов А.В., Уридия З.П. Влияние легирования РЗМ на жаропрочность литейных магниевых сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2014. №5. С. 34–38.
21. Уридия З.П., Мухина И.Ю. О герметизации отливок из магниевых и алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. 2012. №2. С. 34–38.
22. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов // *Металлургия машиностроения*. 2005. №6. С. 29–31.

-
23. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.09.2016).
 24. Мухина И.Ю., Кошелев А.О., Леонов А.А., Бобрышев Д.Б. Устранение литейных дефектов отливок из магниевых сплавов методом заварки // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №2. С. 22–27. (дата обращения: 30.09.2016).
 25. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Леонов А.А., Уридия З.П. Влияние легирования редкоземельными металлами на свойства и структуру литейного магниевго сплава экспериментального состава системы Mg–Zr–Zn–Y–Nd // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-3-3.
 26. Леонов А.А., Дуюнова В.А., Ступак Е.В., Трофимов Н.В. Литье магниевых сплавов в разовые формы, полученные новыми методами // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1.
 27. Уридия З.П., Мухина И.Ю., Фролов А.В., Леонов А.А. Исследование микроструктуры магниеводциркониевой лигатуры и жаропрочного литейного магниевго сплава МЛ10 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2016). DOI 10.18577/2307-6046-2015-0-10-6-6.