

УДК 669.046.516

З.П. Уридия<sup>1</sup>, И.Ю. Мухина<sup>1</sup>, В.А. Дуюнова<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>**ПРИЧИНЫ ФЛЮСОВОЙ КОРРОЗИИ В ОТЛИВКАХ  
ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ЛИТЕЙНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ10**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-2-2

*Представлены результаты исследования микро- и макроструктуры магниевозиркониевой лигатуры, предварительного сплава МЦр1N3 и сплава МЛ10, приготовленного из перечисленных шихтовых материалов. Непосредственное сплавление элементов с температурой плавления, превышающей температуру плавления магния, затруднено. Легирование магниевых сплавов цирконием осуществляется с помощью предварительно приготовленной лигатуры «магний–цирконий», имеющей более низкую температуру плавления, чем цирконий. Проблема легирования легких сплавов цирконием возникает не только вследствие высокой температуры его плавления, но и из-за его активности – взаимодействия с водородом, кислородом, азотом, алюминием, железом, кремнием, углеродом и другими элементами.*

*Рассмотрены причины: загрязнения литейного магниевого сплава МЛ10 нерастворимыми в магнии интерметаллидами циркония с кремнием, железом, алюминием и соединений циркония с кислородом и водородом; образования дефектов «флюсовые включения» и, как следствие, появления флюсовой коррозии в отливках.*

*Предложены мероприятия по устранению причины загрязнения сплава флюсовыми включениями и контролю технологических режимов плавки и литья сплава МЛ10.*

*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:** магниевозиркониевая лигатура, магниевый сплав, микроструктура, макроструктура, соединения циркония (цирконида), флюсовые включения, флюсовая коррозия.

*The given article presents the results of the research of micro- and macrostructure of magnesium-zirconium additional alloy, preliminary alloy MTsr1N3 and alloy ML10 made of the listed batched materials. The alloying is hard for the elements melting points of which are higher than the melting point of magnesium. The zirconia alloying of magnesium alloys is processed through the preliminary magnesium-zirconium additional alloy melting points of which are lower than the melting point for zirconium. The zirconia alloying of light alloys is difficult not only because the melting points for zirconium are too high, but because of its activity as well: zirconium interacts with hydrogen, oxygen, nitrogen, aluminum, ferrum, silicon, carbon and other elements.*

*The origins of contamination of magnesium alloy ML10 with the elements that are infusible with magnesium, such as intermetallides of zirconium and aluminum or ferrum or silicon and molecular entities of zirconium-oxygen and zirconium-hydrogen have been examined. The origins of «flux inclusion» defects resulting in the appearance of flux corrosion in moldings have also been reviewed.*

*The measures for eliminating the origins of flux inclusion in alloys were proposed as well as the methods for control of operating practices of alloying and molding of ML10.*

*The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 10.10. «Energy-efficient, resource-saving and additive technology of deformed semi-finished products*

*and shaped castings from magnesium and aluminum alloys» («Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** *magnesium-zirconium ligature, magnesium alloy, microstructure, macrostructure, zirconium molecular entities, flux inclusion, flux corrosion.*

<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

Литейные магниевые сплавы успешно применяются там, где имеет большое значение снижение массы конструкции. Основными преимуществами литейных магниевых сплавов как конструкционного материала являются малая плотность, высокая способность поглощения энергии удара и вибрационных колебаний, достаточно высокая удельная прочность.

Литейные магниевые сплавы обладают хорошими технологическими свойствами. Из них можно изготавливать детали методом литья в формы из песчано-глинистых (ПГС) и холоднотвердеющих смесей (ХТС), в кокиль и под давлением.

Успешной реализации стратегических направлений развития в области создания конструкций из материалов с низкой плотностью и стабильными прогнозируемыми характеристиками, а также их безопасной эксплуатации способствует разработка и внедрение в производственный процесс эффективной технологии плавки и литья магниевых сплавов и использование качественных шихтовых материалов [2–8].

В настоящее время в технике наиболее широко применяются литейные магниевые сплавы: МЛ5 и МЛ5п.ч. (система Mg–Al–Zn), МЛ12 (система Mg–Zn–Zr), МЛ10 (система Mg–PЗМ–Zr). Жаропрочный литейный магниевый сплав МЛ10 отличается удачным сочетанием высоких механических свойств как при комнатной, так и при повышенных температурах, обладает достаточно хорошими литейными и технологическими свойствами.

Повышение надежности деталей, изготовленных из сплава МЛ10, существенным образом зависит от качества исходного сырья – готового чушкового сплава МЦр1НЗ, магниевое-циркониевой лигатуры, из которой в сплав вводится цирконий, покровных и рафинирующих флюсов [9–18]. Особенно резкое снижение коррозионной стойкости наблюдается при наличии загрязнений полуфабрикатов включениями хлористого флюса.

При плавке магниевых сплавов необходимо учитывать их специфические особенности. Вследствие большого сродства магния к кислороду, поверхность расплавленного металла необходимо защищать специальными флюсами или газами. Для того чтобы избежать горения металла при литье, в состав формовочных смесей вводят защитные присадочные материалы [19–21].

Исследование микро- и макроструктуры позволяет определить полноту проведенной термической обработки, выявить дефекты и их расположение относительно кристаллизующихся в сплаве фаз [22–29].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбраны сплавы МЦр1НЗ и МЛ10 на основе магния, легированные PЗМ, Zn, Zr, а также магниевое-циркониевая лигатура марки Л2. Сплав МЛ10 выплавлен с применением флюса ВИ2 по технологии, принятой для получения литейных магниевых сплавов системы Mg–PЗМ–Zr в промышленных условиях из исходного сырья – сплава МЦр1НЗ в чушках и магниевое-циркониевой лигатуры марки Л2. Образцы для исследования вырезаны из серийных отливок, полученных литьем в разовые формы из ПГС и в кокиль.

Исследования микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Leica DM JRM при различных увеличениях. Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335. Соответствие выявленной структуры исследуемого сплава стандартной устанавливали сопоставлением ее с типичной структурой, приведенной в стандарте ОСТ1 90360 «Магниевого литейные сплавы, отлитые в песчаные формы. Определение микроструктуры». Травление шлифов осуществляли в реактиве №3 состава, мл: 0,5–1,0 азотной кислоты и 99,5–99,0 этилового спирта. После воздействия реактива, нанесенного на поверхность, в течение 3–6 с шлиф промывали спиртом и высушивали.

Исследование локального химического состава фаз проводили методом качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Микрорентгеноспектральный анализ образцов из магниево-циркониевой лигатуры выполнен на микроанализаторе JXA-840, а образцов из сплава МЛ10 – на приборе Carl Zeiss EVO MA-10. Проанализированы различные объекты: твердый раствор (зерно); фазы по границам и внутри зерна; включения, находящиеся в порах.

Испытания для оценки коррозионной стойкости проводили в камере влажности WKL100 при постоянной влажности 95–98% и температуре 30°C; время испытаний составило 48 ч.

Определение ионов хлора в продуктах коррозии проводили по ОСТ1 90238–76 «Магниевого сплавы. Контроль слитков, отливок фасонных и деталей на флюсовую коррозию». На коррозионное поражение на поверхности магниевого сплава наносили раствор азотной кислоты марки «ХЧ», разбавленной в 4 раза, и выдерживали в течение 60 с, затем раствор собирали пипеткой и переносили на часовое стекло, разбавляли дистиллированной водой в 3 раза и в получившийся раствор добавляли 0,1 н. раствор азотнокислого серебра. Таким образом реализовывали протекание следующей реакции:  $MgCl_2 + 2AgNO_3 = Mg(NO_3)_2 + 2AgCl$ . В результате чего при наличии ионов хлора  $\geq 0,05$  раствор мутнеет – выпадает осадок.

### Результаты и обсуждение

Получение сплавов возможно непосредственным сплавлением элементов между собой только при введении в расплав магния небольших количеств легирующих элементов с температурой плавления ниже или незначительно превышающей температуру плавления магния. Для металлов с высокой температурой плавления непосредственное сплавление элементов затруднено и легирование осуществляется с помощью предварительно приготовленных лигатур, имеющих более низкую температуру плавления, чем чистые компоненты.

Проблема легирования легких сплавов тугоплавкими металлами, в частности РЗМ и цирконием, возникает не только вследствие высокой температуры их плавления, но и из-за их активности – взаимодействия с водородом, кислородом, азотом, алюминием, железом, кремнием, углеродом и другими элементами.

С целью оценки качества лигатуры и установления причин образования в сплаве МЛ10 дефектов типа «флюсовые включения» и, как следствие, флюсовой коррозии в отливках из сплава МЛ10, проведены исследования образцов лигатуры различных плавок и сливов, отличающихся по содержанию основных компонентов и примесей: циркония, кремния, алюминия, железа, хлора, кислорода, водорода.

Анализ микроструктуры лигатуры показал неоднородность изломов лигатуры различных партий. Для лигатуры характерна дендритная структура, зерна твердого раствора окружены мелкодисперсными фазами интерметаллидов на основе циркония. Имеют место также крупные скопления различной формы – частицы сферической формы типа хлористого калия.

Результаты рентгеноспектрального локального анализа лигатуры, выполненного на микроанализаторе JXA-840, свидетельствуют о том, что твердый раствор состоит из

магния (96,0–98,5%) и циркония (3,8–0,8%). По границам зерна обнаружены скопления элементов различного состава (рис. 1).

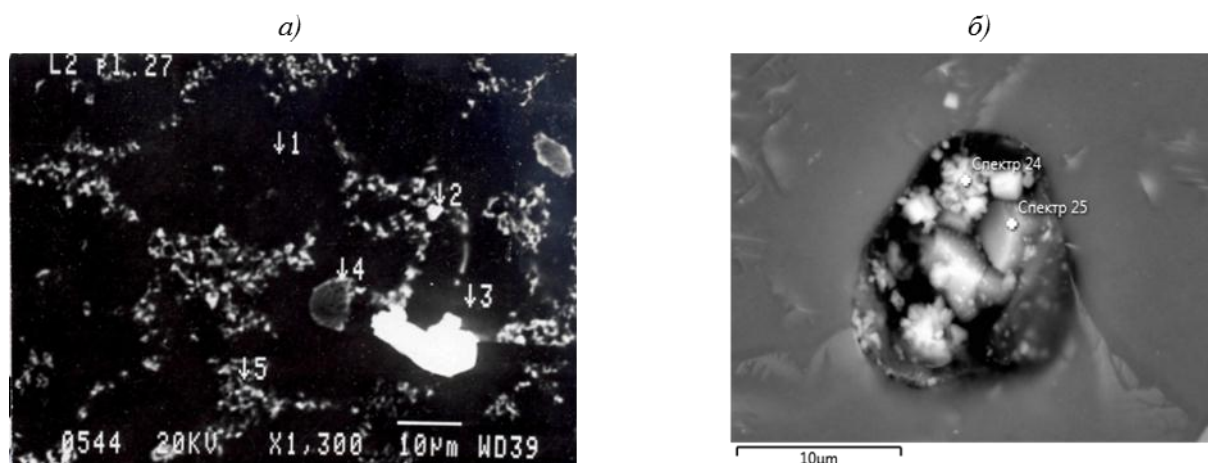


Рис. 1. Микроструктура магниево-циркониевой лигатуры (а):  
– твердый раствор (сектор 1), % (по массе): 96,0–98,5 Mg; 0,8–3,8 Zr; интерметаллиды систем Mg–Zr–Si–Cl–Fe (секторы 2 и 3) и Mg–Zr–Si (секторы 4 и 5);  
а также микроструктура сплава МЛ10 (б) с флюсовым включением состава, % (по массе): 32,3 Mg; 38,69 Cl; 29,02 O<sub>2</sub>

Использование в шихте готового чушкового сплава МЦр1НЗ для получения рабочего сплава МЛ10 позволяет упростить технологический процесс, снизить расход легирующих элементов, обеспечить равномерность состава сплава. Проведены испытания образцов из литейного магниевое сплава МЛ10 и чушкового сплава МЦр1НЗ на наличие на поверхности ионов хлора в продуктах коррозии, определяемых по качественной реакции.

Образцы вырезали из различных частей слитка. Для удаления загрязнений поверхность протирали салфетками, увлажненными ацетоном марки «ХЧ». Поскольку исследуемые магниевые сплавы МЦр1НЗ и МЛ10 содержат цирконий и подвержены окислению при нахождении во влажной среде, перед проведением испытаний на образцы наносили химическое оксидное покрытие в соответствии с ПИ1.2А.501–98 для формирования пассивирующей пленки на поверхности образца. Временной промежуток между изготовлением и постановкой образцов на испытания в камеру влажности WKL100 составил 12 ч.

После испытания в камере влажности WKL100 при постоянной влажности 95–98% и температуре 30°C в течение 48 ч на поверхности всех исследуемых образцов обнаружены коррозионные поражения рис. 2.

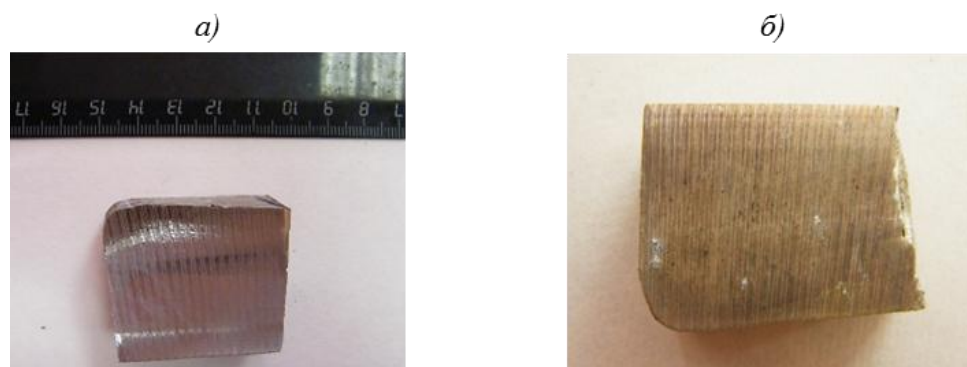


Рис. 2. Образец из сплава МЛ10 до (а) и после испытания (б) в камере влажности WKL100

После процедуры определения ионов хлора в продуктах коррозии в зависимости от содержания ионов хлора образовывался белый осадок (рис. 3).

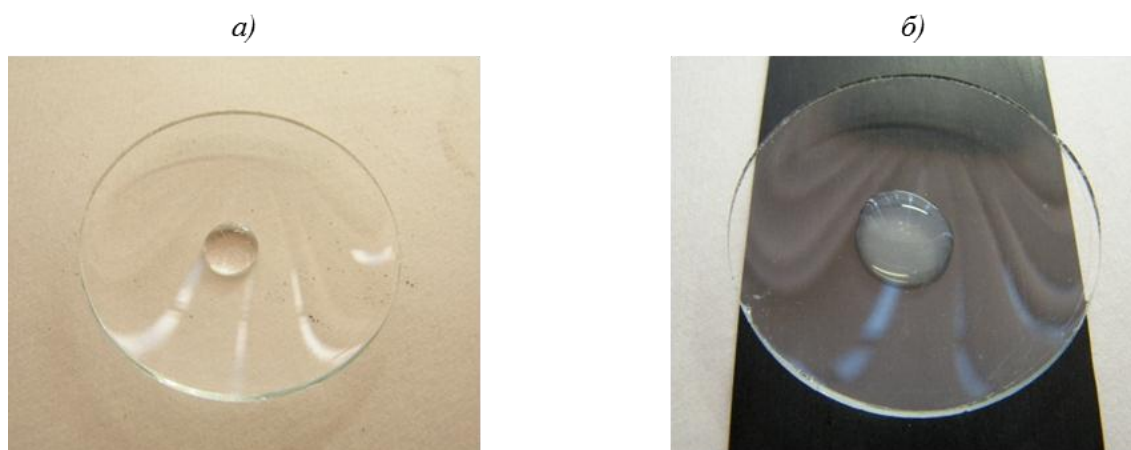


Рис. 3. Определение ионов хлора в продуктах коррозии:

*а* – раствор после пробы, взятой на чистой поверхности магниевого сплава (контрольная проба); *б* – раствор после пробы, взятой с поверхности магниевого сплава, подверженной коррозии (количество ионов хлора  $\geq 0,05$ )

Анализ результатов испытаний образцов на флюсовую коррозию и технологического процесса плавки и литья сплава МЛ10 позволяет предположить, что флюс в отливки попадает как с шихтовыми материалами, так и в процессе плавки и литья сплава МЛ10.

Основным источником образования дефектов типа «флюсовые включения» как в сплаве МЦр1НЗ, так и в сплаве МЛ10, может являться магниево-циркониевая лигатура. Существующий в настоящее время магниево-термический способ производства лигатуры из солевого плава, содержащего тетрахлорид циркония, не позволяет полностью удалить большое количество хлоридов и оксихлоридов, связанных с цирконием. Поэтому в процессе приготовления рабочего сплава МЛ10 следует не допускать излишнего введения лигатуры в сплав МЦр1НЗ. В соответствии с ПИ1.2.772–2007 «Плавка и разливка магниевых сплавов для фасонного литья» при использовании готового сплава МЦр1НЗ цирконий вводится в расплав в количестве 0,7–1,0% от массы чушек.

Содержание циркония в плавке целесообразно получать на уровне среднего состава сплава МЛ10, т. е. 0,5–0,6%, при обязательном контроле механических свойств отдельно отлитых образцов в состоянии Т6 по ГОСТ 2856–79:  $\sigma_b=226,0$  МПа;  $\sigma_{0,2}=137,0$  МПа;  $\delta=3,0\%$ . Избыточное содержание циркония в сплаве МЛ10 может привести к браку литья по флюсовой коррозии. Флюсовая коррозия чаще всего выявляется на конечном этапе производства деталей, т. е. при механической обработке.

Особое внимание при плавке сплава МЛ10 следует уделить соответствию химического состава флюса ВИ2 с ПИ1.2.772–2007.

Флюсы для плавки магниевых сплавов представляют собой смеси хлористых и фтористых солей металлов и некоторых оксидов.

К флюсам предъявляются следующие требования:

- защита шихты от окисления и воспламенения;
- рафинирование расплава от неметаллических примесей (оксидов, нитридов и др.), присутствующих во взвешенном состоянии в расплаве;
- отделение расплавленного металла (и сплава) от солевой фазы и шлаков;

– получение сплава заданного химического состава в результате удаления из расплава вредных примесей (натрия и калия) и в результате усиления перехода в расплав легирующих элементов – циркония, иттрия, неодима, церия и др.

Большинству требований, предъявляемых к флюсам, могут удовлетворять сплавы двух- или треххлористых солей эвтектического типа или близкого к нему, основным из них является карналлит ( $MgCl_2 \cdot KCl$ ). Для получения флюса с требуемыми характеристиками плотности, вязкости, поверхностной активности по отношению к неметаллическим включениям в карналлит вводят корректирующие добавки. Свойства флюсов зависят от свойств солей, входящих в состав флюса. Составы флюсов в соответствии с ПИ1.2.772–2007, рекомендованные для плавки магниевых сплавов, приведены в таблице.

Бариевый флюс представляет собой сплав безводного карналлита с хлористым барием и является основным сырьем для приготовления флюсов марок ВИ2, ФЛ7 и ФЛ6, а в жидком виде используется для промывки ковшей и плавильного инструмента.

Для плавки сплава МЛ10 применяется флюс ВИ2, который представляет собой механическую смесь порошкообразного бариевого флюса с фтористым кальцием. Флюс ВИ2 достаточно хорошо защищает расплав от окисления при приготовлении магниевых сплавов промышленной чистоты.

**Химический состав флюсов (% по массе)**

Флюс	Основные компоненты						Примеси (не более)			Содержание влаги
	Mg	K	Ba	Ca	Mg	Zn	$\Sigma$ хлоридов Ca	оксид магния	нерастворимый остаток флюса	
	хлористый			фтористый						
Бариевый	39 (не менее)	35–43	6–9	–	–	–	10	1,2	1,0	2
ВИ2	38–46	32–42	5–8	3–5	–	–	10	1,5	1,5	3
ФЛ6	32–40	27–37	5–8	8–12	8–12	1–5	10	–	1,0	2
ФЛ7	33–38	29–39	5–8	10–16	–	–	4–12	1,5	–	2

Для снижения в отливках из магниевое-циркониевого сплава МЛ10 флюсовых включений целесообразно в качестве рафинирующего сплава применять один из более тяжелых по плотности флюсов – ФЛ6 или ФЛ7.

Вводимый в расплав флюс вследствие большей своей плотности, чем плотность расплава, должен проходить сверху вниз через весь объем расплавленного в тигле магниевое сплава, смачивая взвешенные частицы оксида магния и другие неметаллические включения, и способствовать осаждению их на дно. Флюсы ФЛ6 и ФЛ7 содержат в большем количестве фтористый кальций, что повышает их плотность и способствует более тщательной очистке (рафинированию) сплава.

Вместе с тем флюс, вследствие высокой гигроскопичности, может являться источником повышения количества водорода в сплаве – тем сильнее, чем выше влажность флюса. Отстаивание расплава перед заливкой металла в формы приводит как к существенному снижению газонасыщенности сплава, так и оседанию флюса, присутствующего во взвешенном состоянии в расплаве.

С целью снижения попадания флюсовых включений в отливку заливку металла в форму следует проводить через фильтр, установленный в заливочную чашу, в виде боя магнезитового кирпича, прогретого до красного свечения. Размер фильтра устанавливается экспериментально для каждой отливки и должен быть максимально возможным для получения качественной отливки, обеспечивая при этом должную скорость заливки металла.

### Заключения

Флюсовая коррозия отливок из сплава МЛ10 может возникать при использовании шихтовых материалов – готового сплава МЦр1Н3 и магниево-циркониевой лигатуры, загрязненных флюсовыми включениями.

Необходимо контролировать количество вводимого в сплав МЛ10 циркония из магниево-циркониевой лигатуры, что позволит получать требуемый уровень прочностных характеристик сплава.

При приготовлении сплава МЛ10 следует применять в качестве покровного флюса ВИ2, а в качестве рафинирующего флюса – один из флюсов марок ФЛ6 или ФЛ7.

В процессе выплавки сплава необходимо контролировать температуру и продолжительность выдержки металла после окончания всех операций перед разливкой в формы. Фильтрацию расплава проводить через фильтры для устранения флюсовых включений.

### 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. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 212–222.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
5. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // *Наука в России*. 2012. №3. С. 36–44.
6. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
7. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
8. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
9. Корчагина В.А. Ради качества магниевых отливок // *Инженерная газета*. 2006. №33–34. С. 5.
10. Садков В.В., Лапонов Ю.Л., Агеев А.П., и др. Перспективы и условия применения магниевых сплавов в самолетах ОАО «Туполев» // *Металлургия машиностроения*. 2007. №4. С. 19–23.
11. Антипов В.В., Вахромов Р.О., Дуюнова В.А., Ночовная Н.А. Материалы с высокой удельной прочностью на основе алюминия, магния, титана и технологии их переработки // *Боеприпасы и спецхимия*. 2013. №3. С. 51–55.
12. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов // *Металлургия машиностроения*. 2005. №6. С. 29–31.
13. Дуюнова В.А. Методы защиты магниевых сплавов в отечественном литейном производстве с 1930-х гг. до настоящего времени // *Литейщик России*. 2010. №10. С. 35–37.
14. Дуюнова В.А., Мухина И.Ю., Уридия З.П. Новые противопопригарные присадочные материалы для литейных форм магниевых отливок // *Литейное производство*. 2009. №9. С. 18–21.
15. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы // *Литейное производство*. 2013. №5. С. 2–5.
16. Дуюнова В.А., Гончаренко Н.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 71–78.

17. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Влияние технологических параметров плавки на структуру и свойства новых магниевых сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2014. №2. С. 26–29.
18. Мухина И.Ю. Литейные сплавы и техпроцессы при производстве магниевых отливок // *Литейное производство*. 2003. №4. С. 18–19.
19. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.
20. Альтман М.Б. и др. *Магниевые сплавы: справочник*. М.: *Металлургия*, 1978. Т. 2. 147 с.
21. Уридия З.П., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Косарина Е.И. Контроль качества литья из магниевых сплавов и способы восстановления герметичности отливок // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-4-4.
22. 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: 28.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1.
23. Шишкарева Л.М., Кузьмина Н.А. Обзор методик определения качества структуры монокристаллических отливок жаропрочных сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №1. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-6-6.
24. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Качура С.М. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в препрегах и ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №12. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2016).
25. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2016).
26. ОСТ1 90427–94. Качество продукции. Неразрушающий контроль литых деталей и полуфабрикатов авиационной техники из алюминиевых и магниевых сплавов радиографическим методом. Общие положения. М.: ВИАМ, 1994. С. 1–17.
27. ОСТ1 90121–90. Магниевые литейные сплавы. Режимы термической обработки. М.: ВИАМ, 1990. С. 1–10.
28. Каблов Е.Н., Мухина И.Ю., Корчагина В.А. Присадочные материалы для формовочных смесей при литье магниевых сплавов // *Литейное производство*. 2007. №5. С. 15–18.
29. Уридия З.П., Мухина И.Ю., Фролов А.В., Леонов А.А. Исследование микроструктуры магниевое-циркониевой лигатуры и жаропрочного литейного магниевоего сплава МЛ10 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-6-6.