



УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-3-3

**ЛИКВАЦИЯ В ОТЛИВКАХ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ,  
СОДЕРЖАЩИХ ЦИРКОНИЙ**

И.Ю. Мухина

*кандидат технических наук*

З.П. Уридия

*кандидат технических наук*

**Август 2015**

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.

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-3-3

*И.Ю. Мухина<sup>1</sup>, З.П. Уридия<sup>1</sup>*

## **ЛИКВАЦИЯ В ОТЛИВКАХ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЦИРКОНИЙ**

*При производстве литейных магниевых сплавов, содержащих цирконий: МЛ9, МЛ10, МЛ12, МЛ15, ВМЛ20, для корпусных деталей гидроагрегатов, насосов, нагруженного колесного литья, на отдельных обрабатываемых поверхностях отливок встречается неравномерное распределение структурных составляющих, вызванное ликвацией в сплаве в процессе его приготовления и кристаллизации. Рассмотрены природа и механизм образования ликвационных включений. Показано влияние их на свойства отливок.*

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, отливка, ликвация, включения неметаллические, циркониды (соединения циркония).

*I.Yu. Mukhina, Z.P. Uridiya*

## **LIQUATION IN CASTINGS MADE OF Zr-BEARING MAGNESIUM ALLOYS**

*An uneven distribution of structural components caused by the segregation processes in the alloy during its melting and crystallization may occur on separate machined surfaces of castings in the course of production of Zr-bearing cast magnesium alloys: ML9, ML10, ML12 and VML20 intended for housing parts of hydraulic units, pumps, loaded wheel castings. The article describes the nature and formation mechanism of segregated inclusions. Their influence on the properties of castings is shown.*

**Keywords:** magnesium alloys, casting, liquation, non-metallic inclusions, zirconium compounds.

---

<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**

К магниевым сплавам и технологиям литья из них изделий (деталей), используемых в конструкциях летательных аппаратов космической и авиационной техники, гидроагрегатов, насосов, посадочных устройств и других отечественных приборов, предъявляются особые требования [1–5].

Потребность в магниевых сплавах значительно превышает возможности их производства. Это ставит перед металлургами, технологами и разработчиками новые задачи – повышение качества литья, использование при выплавке лома и стружки, создание безотходных и малоотходных технологий производства, решение вопросов экологичности производства [6–9].

Разработаны магниево-циркониевые сплавы с высокими прочностными характеристиками и малой плотностью. Существующие технологии литья позволяют производить сложное крупное, среднее и мелкое литье различными способами:

- в формы: песчаные и из холодно-твердеющей смеси;
- литье под давлением [10–15].

В основе современных магниевых литейных сплавов лежат многокомпонентные системы, поэтому следует иметь в виду, что факторами, обеспечивающими высокие свойства отливок из этих сплавов, являются равномерность химического и фазового состава, мелкозернистое строение литой структуры, отсутствие ликвационных процессов. При решении этой задачи большую роль играют шихтовые материалы (чушковые готовые сплавы, лигатуры, модификаторы, рафинирующие средства) [16–25].

При производстве литейных магниево-циркониевых сплавов МЛ10, МЛ12, ВМЛ20, используемых для изготовления корпусных деталей гидроагрегатов, насосов, дисков авиационных колес, на отдельных обрабатываемых поверхностях отливок встречается неравномерное распределение структурных составляющих, вызванное процессами ликвации в сплаве при его приготовлении и кристаллизации.

Данная работа посвящена изучению природы и механизма образования неметаллических и ликвационных включений в отливках из магниевых высокопрочных и жаропрочных литейных сплавов МЛ12, МЛ15, МЛ9, МЛ10, ВМЛ20, а также исследованию влияния ликвации на механические и коррозионные свойства сплавов.

## **Материалы и методы**

Проведены лабораторные плавки заготовок массой 10 кг. Из выплавленных заготовок выполнены образцы для исследования химического состава и механических свойств магниевых сплавов.

Рентгеновский контроль полученных образцов проводили в соответствии с ОСТ1 90427–94 «Качество продукции. Неразрушающий контроль литых деталей и полуфабрикатов авиационной техники из алюминиевых и магниевых сплавов радиографическим методом. Общие положения» и производственной инструкцией ПИ1.2.226–2008 «Неразрушающий контроль (НК) металлических изделий рентгеновскими методами».

Химический состав сплавов по основным легирующим элементам (Mg, Zn, Zr, Nd) и примесям (Al, Si, Fe, Ni, Cu) определяли спектральным методом на атомно-эмиссионном Varian730-ES, рентгено-флюоресцентном S4 Explorer и оптико-эмиссионном Q8 Magellan спектрометрах в соответствии с ГОСТ 7728–79 «Сплавы магниевые. Методы спектрального анализа».

Термическую обработку образцов, вырезанных из отливок, проводили по режиму T4 в соответствии с ОСТ1 90121–90 «Магниевые литейные сплавы. Режимы термической обработки».

Механические свойства при растяжении ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) образцов, вырезанных из отливок, при комнатной температуре определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытания на растяжение».

Фрактографический анализ изломов образцов из сплава МЛ5 выполнен на электронном сканирующем микроскопе фирмы Jeol.

## Результаты

В отливках из магниевых сплавов встречаются несколько видов ликвации: внутрикристаллическая (дендритная), зональная (так называемые «залеченные» трещины и червоточины), обратная («серые» пятна).

*Внутрикристаллическая ликвация* (в частности, циркония), характерная для магниевых сплавов, является нормой. Особенность литейных магниевых сплавов заключается в небольшой величине зерен с неравномерным химическим составом, размеры которых не превышают 0,5 мм. Периферийная часть зерна по сравнению с центром больше обогащена легирующими элементами и примесями. Обратную картину имеет внутризеренная ликвация (в сплавах, содержащих цирконий): зона, обогащенная легирующими элементами, находится внутри зерна. Это связано с тем, что выделяющиеся из

расплава в процессе зародышеобразования частицы циркония или его соединений служат центрами кристаллизации: взаимодействуя с расплавом, они образуют в растущем зерне зону твердого обогащенного цирконием раствора. В центре такой зоны (3–5 мкм), где расположен зародыш, содержание циркония может достигать 75% (по массе), у границы ликвационной зоны оно резко падает до ~4% (по массе) и затем плавно снижается до нескольких десятых долей процента около границы зерна. Обогащенные цирконием зоны в зернах сплава Mg–0,6Zr представлены на рис. 1.



Рис. 1. Микроструктура ( $\times 10\ 000$ ) жаропрочного магниевого сплава с ликвационными включениями цирконидов

Наибольший эффект от легирования может наблюдаться тогда, когда легирующий элемент максимально равномерно распределен по объему зерна (дендрита). Внутрикристаллическая ликвация может быть в значительной мере устранена в процессе гомогенизации (отжига) сплава.

*Зональная ликвация* заключается в том, что химический состав некоторых участков отливки отличается от состава той пробы сплава, которая взята из тигля. Зональная ликвация проявляется в виде обратной ликвации, «залеченных» трещин и червоточин. Колебание химического состава в отдельных частях отливки, вызванное обратной ликвацией, не может быть устранено термической обработкой.

Зональная ликвация возникает в том случае, когда в отдельных частях отливки кристаллизация расплава начинается и заканчивается преждевременно – задолго до полного заполнения формы, а также когда некоторые области отливки примыкают к потоку жидкого металла, по которому идет заполнение других частей отливки. Обогащенный легирующими элементами расплав у фронта кристаллизации вымывается движущимся сплавом – таким образом происходит обеднение легирующими элементами

ми зон отливки, примыкающих к протоку. После окончания заполнения формы сплав в протоке затвердевает и имеет средний по легирующим элементам состав, а зоны отливки, примыкающие к протоку, – пониженное содержание основных легирующих элементов (неодима и циркония – в сплавах МЛ9 и МЛ10).

В отливках из сплавов МЛ9, МЛ10 и ВМЛ20 при рентгеновском исследовании «залеченные» трещины обнаруживаются легко благодаря различию в цвете оксидной пленки протока и примыкающих зон. Ликвация этого вида отчетливо видна на поверхности отливки. Ликвация этого типа практически не оказывает влияния на механические свойства сплава при комнатной температуре, поэтому ее наличие допускается в отливках без ограничений.

«Залеченные» трещины представляют собой заполненные эвтектикой полости горячих трещин. Микроструктура в такой зоне отличается от микроструктуры сплава: по сравнению с бездефектной зоной характеристики выносливости и прочности в ней при растяжении в условиях комнатной температуры несколько снижаются. При этом жаропрочность, напротив, может даже возрастать.

В отливках из сплавов, содержащих цирконий, наблюдается *ликвация по плотности* циркония или его соединений с цинком и примесями алюминия, железа, кремния, марганца, водорода и другими. На рентгеновском снимке такая ликвация представлена в виде «светлых» пятен размерами от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Ликвация этого вида чаще всего наблюдается в массивных сечениях отливки и у литников. В изломах отливки ликваты имеют вид черных точек и пятен. Содержание циркония в ликватах отливок из сплава МЛ12 может достигать 1,7% (по массе). Включения циркония и его соединений образуются, главным образом, в кристаллизующемся сплаве, особенно в процессе охлаждения, и частично – в момент кристаллизации.

Ликвация этого вида наблюдается в толстых стенках отливки и связана с медленной кристаллизацией сплава. В более плотных участках ликвационной зоны отливки содержание циркония выше на ~0,1–0,2% (по массе), чем в менее плотных. В структуре ликвационной зоны обнаруживаются скопления мелких частиц циркония или его соединений. Ликвация циркония и его соединений даже при значительном развитии не снижает механических свойств и поэтому допускается в отливках без ограничения при условии, что включения не попали в отливку со дна тигля и не являются флюсовыми.

На рис. 2 видно, что в изломе отливки ликвационные включения размерами от 20–40 мкм до 1–3 мм окрашены в темный цвет и расположены цепочками преимущественно в среднем сечении стенки отливки, а в ряде случаев наблюдаются на поверхности.



Рис. 2. Макроструктура излома отливки сплава МЛ10 с ликвационными включениями цирконидов

Исследование микроструктуры по месту включений не выявило отклонений от типичной структуры для этих сплавов.

Химический анализ ликвационных зон отливки из сплава МЛ12 показал содержание растворенного циркония 0,7% (по массе) при среднем его содержании 0,59% (по массе). Локальный спектральный анализ включений показал повышенное содержание циркония и примесей алюминия, кремния, железа.

Исследована структура литых образцов из сплава МЛ10, вырезанных из мест, имеющих ликвационные выделения. Выявлены беспорядочно расположенные колонны мелких частиц округлой формы с резко очерченными и легко растворяющимися границами.

После термической обработки интерметаллидные соединения по границам твердого раствора почти полностью растворяются.

Результаты химического и спектрального анализа образцов из сплава МЛ10, вырезанных из выпорной части отливок, имеющих ликвацию («серые» пятна), и зон, свободных от ликвации (без «серых» пятен), приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты химического анализа образцов из сплава МЛ10**

Место анализа	Содержание элементов, % (по массе)						
	Nd	Zn	Zr	Al	Cu	Fe	Si
Зоны с «серыми» пятнами	2,43	0,44	0,75	Нет	0,002	0,003	0,01
Зоны без «серых» пятен	2,60	0,47	0,57	Нет	0,002	0,003	0,007
Анализ по плавке	2,32–2,40	0,4–0,43	0,55–0,59	–	–	–	–
Требования по ТУ	1,9–2,6	0,2–0,8	0,4–1,0	0,03	0,03	0,03	0,03

Неоднородность распределения циркония в сплаве МЛ10 не оказывает влияния на его коррозионную стойкость. При испытании в 3%-ном растворе NaCl и гидростате

в течение 96 ч при 20°C и влажности 98% установлено, что количество выделившегося водорода практически одинаково и для образцов, вырезанных из зон с ликвацией ( $1,7 \text{ см}^3/\text{см}^2$ ) и без нее ( $1,65 \text{ см}^3/\text{см}^2$ ).

Механические свойства образцов, вырезанных из частей отливок с ликвационными скоплениями и без них, отвечают требованиям ТУ. Разрушение образцов при механических испытаниях, как правило, происходит не по «серым» пятнам.

Микроструктура сплава с ликвационной зоной и без нее состоит из зерен твердого раствора, окруженных значительным количеством эвтектики  $\alpha+(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ , и является типичной для сплава МЛ10.

На рис. 3 представлена спектрограмма распределения циркония в образце из сплава МЛ12 по месту включений (черные точки) – зона *а* и по месту, свободному от включений – зона *б*. Спектрограмма демонстрирует, что включения представляют собой богатые цирконием соединения.

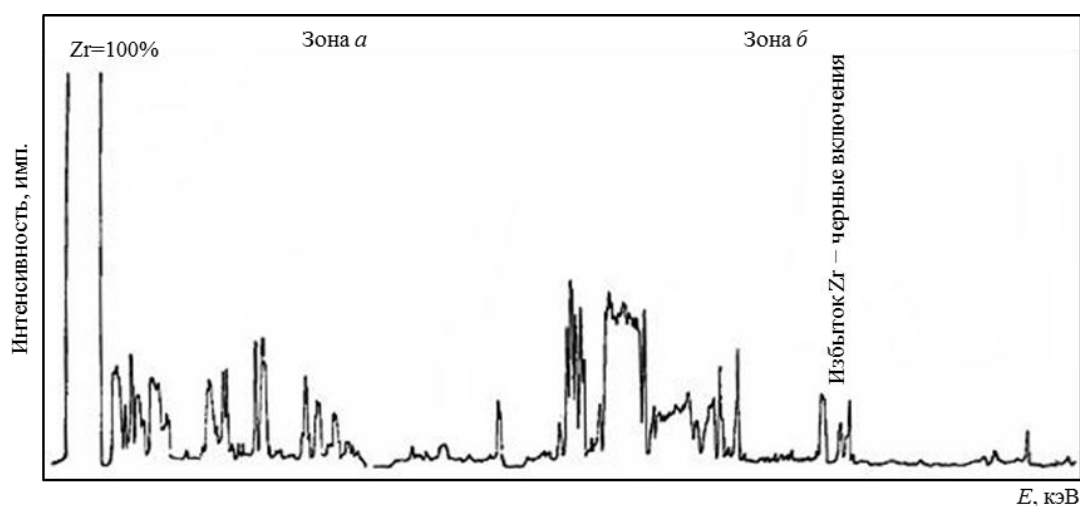


Рис. 3. Спектрограмма распределения циркония в зонах сплава МЛ12 с ликвацией и без нее

Влияние включений на коррозионную стойкость отливок устанавливалось на основании испытаний образцов, вырезанных из отливок, путем погружения их в 3%-ный раствор NaCl в течение 48 ч, а также отливок и изломов образцов, помещенных в гидростат на 48 ч (табл. 2).

Таблица 2

**Коррозионная стойкость сплавов**

Сплав	Система	Количество выделившегося водорода, $\text{см}^3/\text{см}^2$	Наличие ликвационной зоны
МЛ12	Mg–Zn–Zr	2,7	Да
МЛ10	Mg–Zn–Zr–Nd	2,8	
ВМЛ120	Mg–Zn–Zr	3,5	Нет
МЛ12	Mg–Zn–Zr	3,8	

Видно, что заметной разницы в коррозионном поведении сплавов не наблюдается. По количеству выделившегося водорода сплавы соответствуют показаниям, установленным для сплава МЛ5 повышенной чистоты, обладающего наилучшей коррозионной стойкостью.

Ликвационные включения в изломах отливок после испытаний в гидростате с влажностью 98% при температуре 20°C после выдержки в течение 48 ч темнеют и увеличиваются в размерах. Как правило, эти включения не связаны с ионами хлора.

Механические свойства образцов, вырезанных из отливок с ликвационными включениями (черные точки), практически не отличаются от механических свойств отливок без ликвационных включений и отвечают требованиям ТУ.

По результатам рентгеновского исследования обнаружены включения в виде чередующих скоплений хлопкообразных «светлых» и «темных» пятен (рябизна), расположенные преимущественно в массивных сечениях отливок, а также в местах, близких к стенкам отливки. На оксидированной поверхности отливок из сплава МЛ10 по местам рябизны обнаруживаются ликвационные «серые» пятна. На неоксидированной поверхности «серые» пятна слабо заметны. На оксидированных отливках из сплава МЛ12 заметных цветовых различий между участками с зонами ликвации и без них не отмечается.

Изучение микроструктуры сплавов МЛ9 и МЛ10 в литом и термически обработанном состоянии показало, что структура шлифов литого сплава, вырезанных из мест, свободных от ликвационных выделений, представлена зернами твердого раствора неодима, индия и циркония в магнии, а также эвтектикой (по границам зерен). Для жаропрочного сплава МЛ9 в состав эвтектики помимо твердого раствора входят соединения  $Mg_{12}Nd$  и фаза  $Mg_x(NdInZn)_y$ , появление которой обусловлено присутствием индия.

### **Обсуждение и заключения**

В результате исследований установлено, что образование «серых» пятен и точек, связано со структурной неоднородностью материала отливки – выделением частиц циркония или его соединений в массивных местах, а различие структуры является следствием межзеренной ликвации, вызванной неодинаковыми условиями кристаллизации отливки.

Механические и коррозионные свойства зон с ликвационными выделениями и без них практически одинаковы.

Ликвация, выявляющаяся при рентгеновском исследовании отливок в виде линейных течений и структурной неоднородности, не является признаком брака.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
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. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути //Наука в России. 2012. №3. С. 36–44.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
6. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов //Металлургия машиностроения. 2005. №6. С. 29–31.
7. 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.
8. 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.
9. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы: Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
10. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы //Литейное производство. 2013. №5. С. 2–5.
11. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное направление академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ //Цветные металлы. 2013. №9. С. 71–78.
12. 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.
13. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).

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. Леонов А.А., Дуюнова В.А., Ступак Е.В., Трофимов Н.В. Литье магниевых сплавов в разовые формы, полученные новыми методами //Труды ВИАМ. 2014. №12. Ст. 01 (viam-works.ru).
16. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
17. Мухина И.Ю. Литейные сплавы и техпроцессы при производстве магниевых отливок //Литейное производство. 2003. №4. С. 18–19.
18. Уридия З.П., Мухина И.Ю. Новые пропитывающие материалы для герметизации отливок из алюминиевых и магниевых сплавов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №8. С. 37–41.
19. Уридия З.П., Мухина И.Ю. О герметизации отливок из алюминиевых и магниевых сплавов //Литейное производство. 2012. №2. С. 14–16.
20. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Качура С.М. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в препрегах и ПКМ (обзор) //Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 06 (viam-works.ru).
21. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 06 (viam-works.ru).
22. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов //Литейное производство. 2011. №12. С. 12–14.
23. Мухина И.Ю., Уридия З.П., Степанов В.В. Исследование качества магниеводциркониевой лигатуры /В кн.: Магниевые сплавы для современной техники. М.: Наука. 1992. С. 135–142.
24. Рохлин Л.Л. Магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы. М.: Наука. 1980. С. 47–55.
25. 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. 2014. №12. Ст. 04 (viam-works.ru).

## REFERENCES LIST

1. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primeneniya magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Perspectives of application of magnesium and cast aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. C. 212–222.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
3. Kablov E.N. VIAM: prodolzhenie puti [VIAM: way continuation] //Nauka v Rossii. 2012. №3. S. 36–44.
4. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. №4. S. 2–7.
5. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
6. Muhina I.Ju., Uridija Z.P. Magnij – osnova sverhlegkih materialov [Magnesium – basis of extralight materials] //Metallurgija mashinostroenija. 2005. №6. S. 29–31.
7. Antipov V.V., Vahromov R.O., Dujunova V.A., Nochovnaja N.A. Materialy s vysokoj udel'noj prochnost'ju na osnove aljuminija, magnija, titana i tehnologii ih pererabotki [Materials with high specific strength on the basis of aluminum, magnesium, titanium and technology of their processing] //Boepripasy i spechimija. 2013. №3. S. 51–55.
8. Sadkov V.V., Laponov Ju.L., Ageev A.P. i dr. Perspektivy i uslovija primeneniya magnievyh splavov v samoletah OAO «Tupolev» [Perspectives and conditions of application of magnesium alloys in JSC Tupolev airplanes] //Metallurgija mashinostroenija. 2007. №4. S. 19–23.
9. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy: Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
10. Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Perspektivnye litejnye magnievyje splavy [Perspective cast magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №5. S. 2–5.
11. Dujunova V.A., Goncharenko N.S., Muhina I.Ju., Uridija Z.P., Volkova E.F. Nauchnoe napravlenie akademika I.N. Fridljandera. Sovremennye issledovanija magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov v VIAM [Scientific direction of academician I.N. Fridlyandera.

- Modern researches of magnesium and cast aluminum alloys in VIAM] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 71–78.
12. Frolov A.V., Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov plavki na strukturu i svojstva novyh magnievykh splavov [Influence of technological parameters of melting on structure and property of new magnesium alloys] //Metallurgija mashinostroenija. 2014. №2. S. 26–29.
  13. Goncharenko E.S., Trapeznikov A.V., Ogorodov D.V. Litejnye aljuminievye splavy (k 100-letiju so dnja rozhdenija M.B. Al'tmana) [Cast aluminum alloys (to the 100 anniversary since the birth of M.B. Altman)] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 02 (viam-works.ru).
  14. Dujunova V.A., Muhina I.Ju., Uridija Z.P. Novye protivoprigarnye prisadochnye materialy dlja litejnyh form magnievykh otlivok [New protivoprigarny prisadochny materials for casting molds of magnesium otlivka] //Litejnoe proizvodstvo. 2009. №9. S. 18–21.
  15. Leonov A.A., Dujunova V.A., Stupak E.V., Trofimov N.V. Lit'e magnievykh splavov v razovye formy, poluchennye novymi metodami [Molding of magnesium alloys in the one-time forms received by new methods] //Trudy VIAM. 2014. №12. St. 01 (viam-works.ru).
  16. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
  17. Muhina I.Ju. Litejnye splavy i tehprocessy pri proizvodstve magnievykh otlivok [Cast alloys and technical processes by production of magnesium otlivka] //Litejnoe proizvodstvo. 2003. №4. S. 18–19.
  18. Uridija Z.P., Muhina I.Ju. Novye propityvajushhie materialy dlja germetizacii otlivok iz aljuminievykh i magnievykh splavov [New impregnating materials for sealing of otlivka from aluminum and magnesium alloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2011. №8. S. 37–41.
  19. Uridija Z.P., Muhina I.Ju. O germetizacii otlivok iz aljuminievykh i magnievykh splavov [About sealing of otlivka from aluminum and magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №2. S. 14–16.
  20. Postnov V.I., Burhan O.L., Rahmatullin A.Je., Kachura S.M. Nerazrushajushhie metody kontrolja sodержanija svjazujushhij v prepregah i PKM (obzor) [Nondestructive control methods of the contents binding in prepregs and PKM (review)] //Trudy VIAM. 2013. №12. St. 06 (viam-works.ru).
  21. Murashov V.V. Nerazrushajushhij kontrol' zagotovok i detalej iz uglerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala dlja mnogorazovogo kosmicheskogo korablja «Buran» [Non-

- destructive testing of preparations and details from carbon - carbon composite material for the reusable Snow-storm spacecraft] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 06 (viam-works.ru).
22. Muhina I.Ju. Struktura i svojstva novyh litejnyh magnievych splavov [Structure and properties of new cast magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstva. 2011. №12. S. 12–14.
23. Muhina I.Ju., Uridija Z.P., Stepanov V.V. Issledovanie kachestva magnievo-cirkonijevoj ligatury [Research of quality of magnesium-zirconium ligature] /V kn.: Magnievye splavy dlja sovremennoj tehniki. M.: Nauka. 1992. S. 135–142.
24. Rohlin L.L. Magnievye splavy, sodержashhie redkozemel'nye metally [The magnesium alloys containing rare earth metals]. M.: Nauka. 1980. S. 47–55.
25. Uridija Z.P., Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Kosarina E.I. Kontrol' kachestva lit'ja iz magnievych splavov i sposoby vosstanovlenija germetichnosti otlivok [Molding quality control from magnesium alloys and ways of recovery of tightness of otlivka] //Trudy VIAM. 2014. №12. St. 04 (viam-works.ru).