



УДК 621.791.3: 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-6-6

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МАГНИЕВО-
ЦИРКОНиеВОЙ ЛИГАТУРЫ И ЖАРОПРОЧНОГО
ЛИТЕЙНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ10**

З.П. Уридия

кандидат технических наук

И.Ю. Мухина

кандидат технических наук

А.В. Фролов

А.А. Леонов

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.

З.П. Уридия¹, И.Ю. Мухина¹, А.В. Фролов¹, А.А. Леонов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МАГНИЕВО-ЦИРКОНИЕВОЙ ЛИГАТУРЫ И ЖАРОПРОЧНОГО ЛИТЕЙНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ10

Представлены исследования микроструктуры магниево-циркониевой лигатуры и сплава МЛ10. Непосредственное сплавление элементов с температурой плавления, превышающей температуру плавления магния, затруднено. Легирование магниевых сплавов цирконием осуществляется с помощью предварительно подготовленной 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.

Исследовано качество лигатуры и установлены причины снижения извлечения циркония из лигатуры при приготовлении магниевого сплава МЛ10, связанные с присутствием в лигатуре нерастворимых интерметаллидов циркония и гафния с кремнием, железом, алюминием и соединений циркония с кислородом и водородом.

Рассмотрены причины загрязнения литейного магниевого сплава МЛ10 соединениями циркония и примесей, а также целесообразность корректировки технологических режимов термической обработки для стабилизации структуры сплава МЛ10.

Ключевые слова: *магниево-циркониевая лигатура, магниевый сплав, микроструктура, циркониды (соединения циркония).*

Z.P. Uridiya, I.Y. Mukhina, A.V. Frolov, A.A. Leonov

STUDY OF MICROSTRUCTURE OF MAGNESIUM-ZIRCONIUM MASTER ALLOY AND HEAT-RESISTANT MAGNESIUM ALLOY ML10

This article presents the research of microstructure of magnesium-zirconium and ML10 alloys. It is hard to alloy magnesium with elements for which the fusing temperature is higher than that of magnesium's. The impurity doping of magnesium alloy with zirconium is processed through the magnesium-zirconium alloy, for which the fusing

temperature is lower than the fusing temperature for zirconium. The impurity doping of light materials with zirconium is problematic not only because of the high fusing temperature of zirconium, but also because of its active liaison with other elements such as hydrogen, oxygen, nitrogen, aluminum, ferrum, silicon, carbon and other elements.

The quality of alloy has been examined and the reasons of lower drawing of zirconium in the process of making ML10 magnesium alloy had been defined: it is linked with the fact that there are non-soluble intermetallides in the alloy such as zirconium and hafnium with silicon, ferrum and aluminum, and zirconium with oxygen and hydrogen.

The reasons of pollution the ML10 magnesium alloys with zirconium compounds and residual elements had been studied and the advisability of readjustment of heat treatment routines for stabilization of the ML10 alloy structure had been analyzed as well.

Keywords: *magnesium-zirconium master alloy, magnesium alloy, microstructure, compounds of zirconium.*

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

Успешной реализации стратегических направлений развития в области создания конструкций из материалов с низкой плотностью и стабильными прогнозируемыми характеристиками, а также их безопасной эксплуатации способствуют разработка и внедрение в производственный процесс эффективных технологий плавки и литья магниевых сплавов и использование качественных шихтовых материалов [1–7].

Повышение надежности деталей, изготовленных из магниево-циркониевых сплавов, существенным образом зависит от качества магниево-циркониевой лигатуры, с помощью которой в эти сплавы вводится цирконий [8–17].

Жаропрочный литейный магниевый сплав МЛ10 разработан на основе системы Mg–PЗМ–Zr и отличается от сплавов системы Mg–Zn–Zr сочетанием высоких механических свойств как при комнатной, так и при повышенных температурах, обладает достаточно хорошими литейными и технологическими свойствами.

Детали из сплава МЛ10 применяются для длительной эксплуатации при температурах 250°C и кратковременной – до 300°C. Одним из основных требований, предъявляемых к сплавам, работающим длительно при повышенных температурах, является стабильность структуры и механических свойств [18–20].

Исследование микроструктуры позволяет определить полноту проведенной термической обработки, выявить дефекты и их расположение относительно кристаллизующихся в сплаве фаз [21–28].

Материалы и методы

Объектами исследований являлись сплав на основе магния МЛ10, легированный РЗМ, Zn и Zr, а также экспериментальная партия магниево-циркониевой лигатуры. Сплав выплавлен по технологии, принятой для получения литейных магниевых сплавов системы Mg–РЗМ–Zr в промышленных условиях. Образцы для исследования вырезаны из серийных отливок.

Исследования микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Leica DM JRM. Соответствие выявленной структуры исследуемого сплава устанавливали путем сопоставления ее с типичной структурой, приведенной в стандарте ОСТ1 90360 «Магниевые литейные сплавы, отлитые в песчаные формы. Определение микроструктуры». Травление шлифов осуществляли в реактиве 3 состава: азотная кислота 0,5–1,0 мл+этиловый спирт 99,5–99,0 мл. После воздействия в течение 3–6 с реактива, нанесенного на поверхность, шлиф промывали спиртом и высушивали.

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

Результаты

Получение сплавов возможно непосредственным сплавлением элементов между собой только при введении в расплав магния небольшого количества 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, связана не только с высокой температурой их плавления, но и с их

химической активностью – взаимодействием с водородом, кислородом, азотом, алюминием, железом, кремнием, углеродом и другими элементами.

С целью оценки качества лигатуры и установления причин снижения количества извлекаемого из лигатуры циркония при изготовлении магниевого сплава МЛ10 проведены исследования образцов лигатуры различных плавов и сливов, отличающихся по содержанию основных компонентов и примесей: циркония, гафния, кремния, алюминия, железа, хлора, кислорода, водорода.

Анализ микроструктуры экспериментальной магниево-циркониевой 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 85–96% (по массе) магния и 0,8–3,8% (по массе) циркония, в некоторых образцах содержится 0,7–1,9% (по массе) алюминия. По границам зерна лигатуры, загрязненной примесными соединениями, обнаружены скопления элементов, различные по количеству и составу: Mg–Zr, Mg–Al–Si, Mg–Zr–Hf, Mg–Zr–Hf–Si, Mg–Zr–Si, Mg–Zr–Hf–Si–Cl–Fe, Mg–Zr–Hf–Si–Cl–Fe–Ti (рис. 1).

Количество интерметаллидной фазы в лигатурах различных партий колеблется от 15% (объемн.) – для лигатуры с хорошей вводимостью циркония до 70% (объемн.) – с низкой (рис. 2).

В результате исследования качества магниево-циркониевой лигатуры установлено, что низкое усвоение циркония расплавом связано с присутствием в лигатуре нерастворимых интерметаллидов циркония и гафния с кремнием, железом, алюминием и сложных соединений типа гидрид-нитридов, оксихлоридов, соединений циркония с кислородом и водородом. Лигатура хорошего качества имеет мелкодисперсные включения нерастворенного элементарного циркония, который может частично растворяться в магнии (в твердом растворе), и небольшое количество интерметаллидных фаз (не более 20% (объемн.)).

Исследование влияния циркония, содержащегося в магниево-циркониевой лигатуре, на его усвоение сплавом МЛ10, механические и коррозионные свойства проводили при поддержании постоянной концентрации гафния и хлора в расплаве с целью исключения их влияния. Установлено, что содержание в лигатуре циркония в количестве

от 10 до 20% (по массе) не влияет на степень его усвоения сплавом. Определяющим является расчетное количество циркония в шихте: 1,3% (по массе) – на свежие металлы и 0,9% (по массе) – на возвраты.

В термически обработанном состоянии типичная структура образцов сплава МЛ10 состоит из зерен твердого раствора неодима и циркония в магнии. Границы зерен на образце 1 (рис. 3, а–г) четкие, скопленений фазы $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ по границам зерен не наблюдается. Это свидетельствует о том, что в процессе закалки вся фаза перешла в твердый раствор, а при старении продукты распада твердого раствора в виде мелкодисперсных упрочняющих частиц расположены внутри зерна (см. рис. 3, в). Микроструктура образца 1 (см. рис. 3, а–в) соответствует типичной для сплава МЛ10 структуре. Область, содержащая поры, расположенные как по границе, так и внутри зерна, показана на рис. 3, г.

Структура образца 2 в отличие от структуры образца 1 более мелкозернистая. На шлифах наблюдаются фазы, расположенные преимущественно по границам зерен (см. рис. 3, д, е). В образце 2 содержание циркония составляет 0,78% (по массе). Такое содержание циркония, близкое к верхнему (расчетному) пределу концентраций, при введении его в сплав из загрязненной лигатуры, по-видимому, может быть причиной образования фаз, представляющих собой циркониды, гидриды и оксихлориды.

Структура образца 3, как и образца 2, мелкозернистая. На шлифе в нетравленном состоянии видна значительная пористость (см. рис. 3, ж). Поры расположены как по границам зерен, так и внутри них (см. рис. 3, ж–и). По границам зерен (см. рис. 3, к) расположено некоторое количество фазы $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$.

Структура образца 4, как и у предыдущих образцов 2 и 3, пористая и имеет неоднородные участки с различной величиной зерна и скоплением фазы $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ (см. рис. 3, л, м).

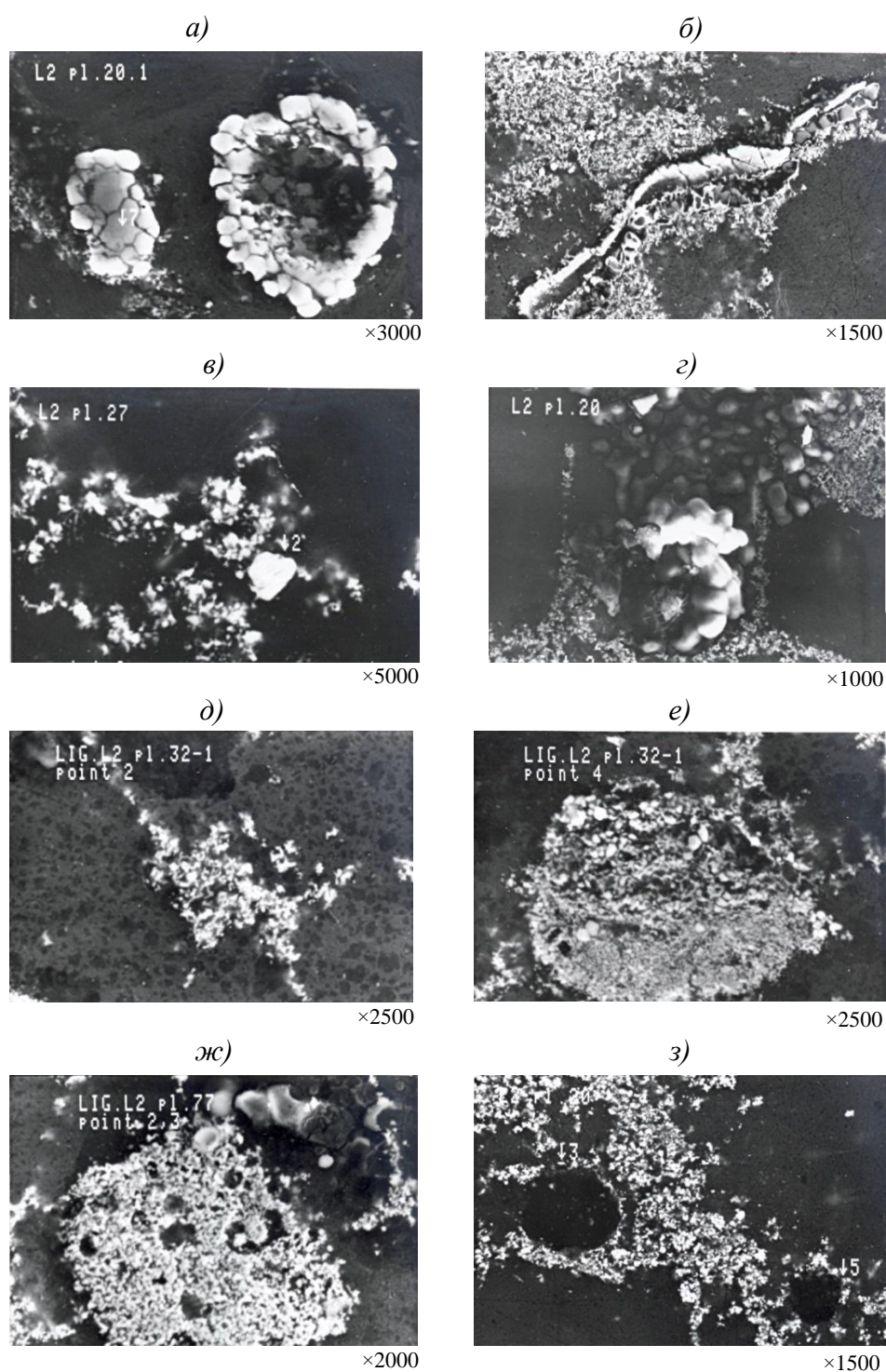


Рисунок 1. Микроструктура экспериментальной магниево-циркониевой лигатуры. Состав фазы, в % (по массе): 1,264 Mg, 97,893 Zr (а); 8,393 Mg, 90,980 Zr (б); 22,713 Mg, 73,351 Zr (в); 54,409 Mg, 43,801 Zr (г); 44,388 Mg, 51,244 Zr, 3,652 Hf (д); 16,714 Mg, 77,784 Zr, 4,545 Hf, 0,426 Si (е); 13,422 Mg, 80,899 Zr, 4,633 Hf, 0,354 Cl (ж); 65,081 Mg, 19,391 Zr, 5,031 Al, 1,217 Cl (з)

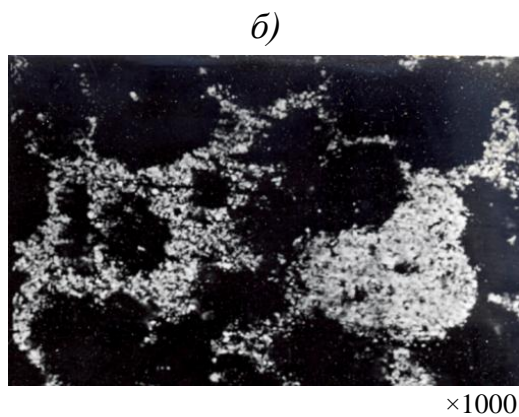
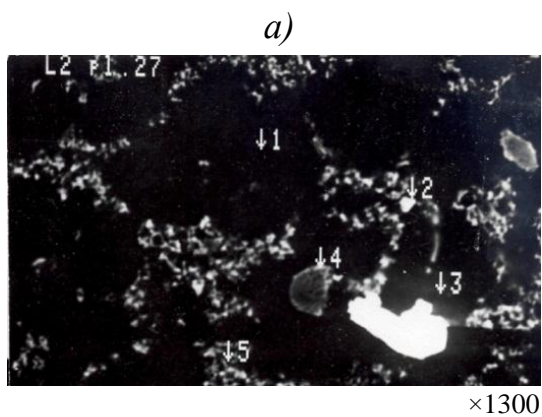


Рисунок 2. Микроструктура экспериментальной магниев-циркониевой лигатуры с различной вводимостью циркония, содержащей интерметаллидную фазу в количестве 15–25% объёмн. (а) и 60–70% объёмн. (б)

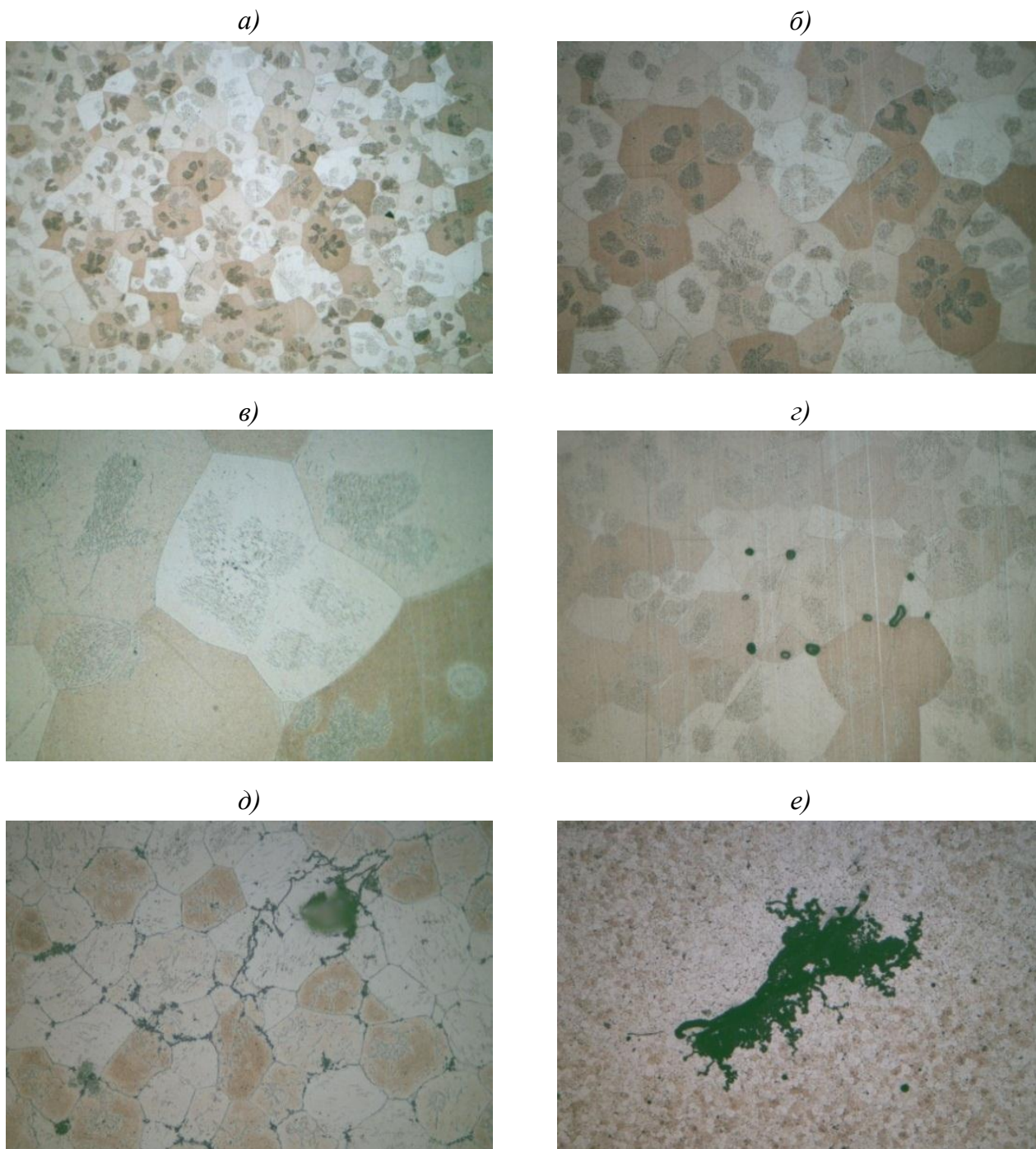


Рисунок 3. Микроструктура экспериментальных образцов 1 (а-г), 2 (д, е) сплава МЛ10 (Т6):

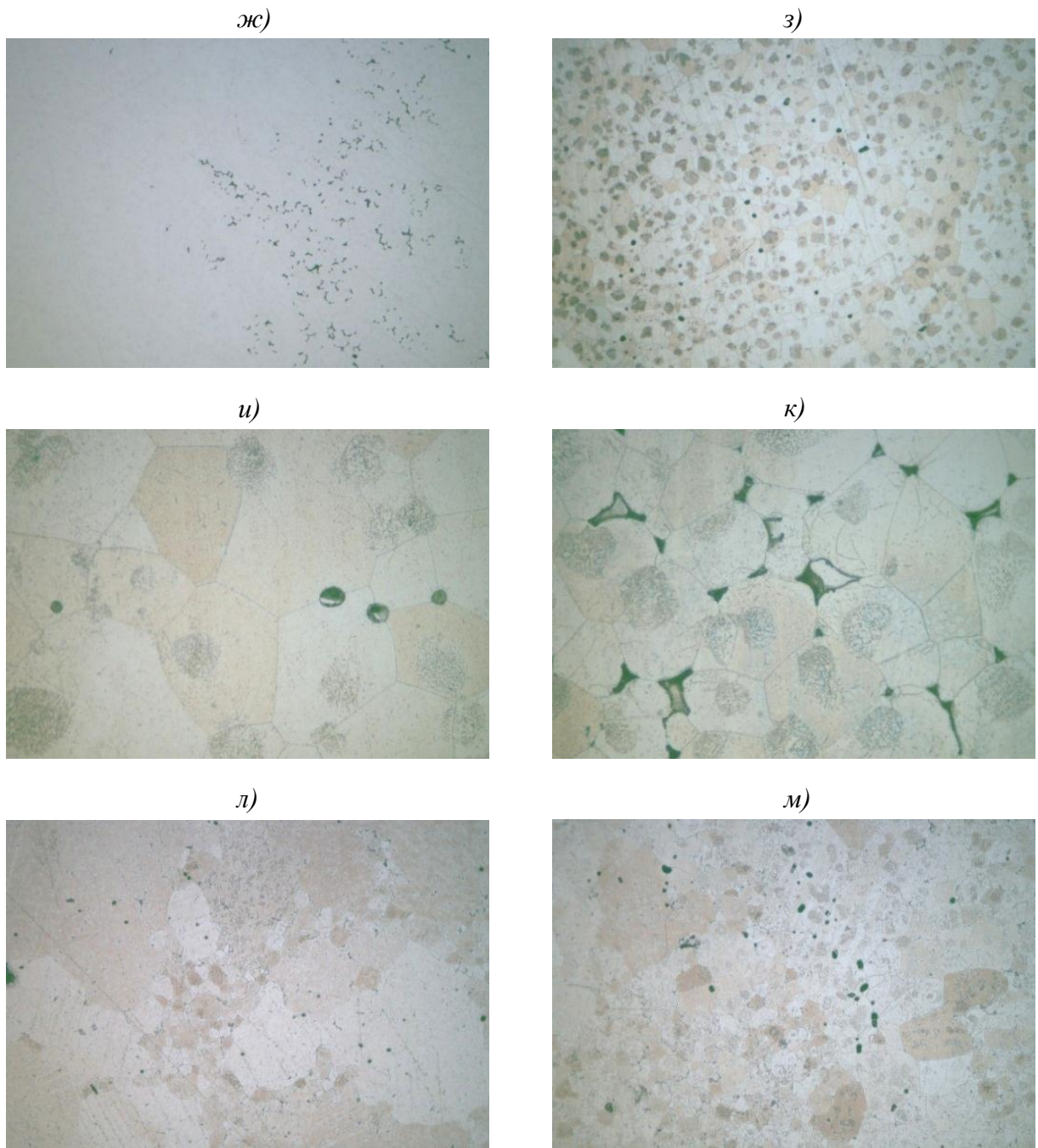


Рисунок 3 (продолжение). Микроструктура экспериментальных образцов 3 (ж–к), 4 (л, м) сплава МЛ10 (Т6)

Образец 3 исследован на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus Lt-XT-OLS-3100 с целью определения размера дефектов, расположенных по границам и внутри зерен. Результаты исследования представлены на рис. 4. Дефекты представляют собой поры с рельефной нижней поверхностью.

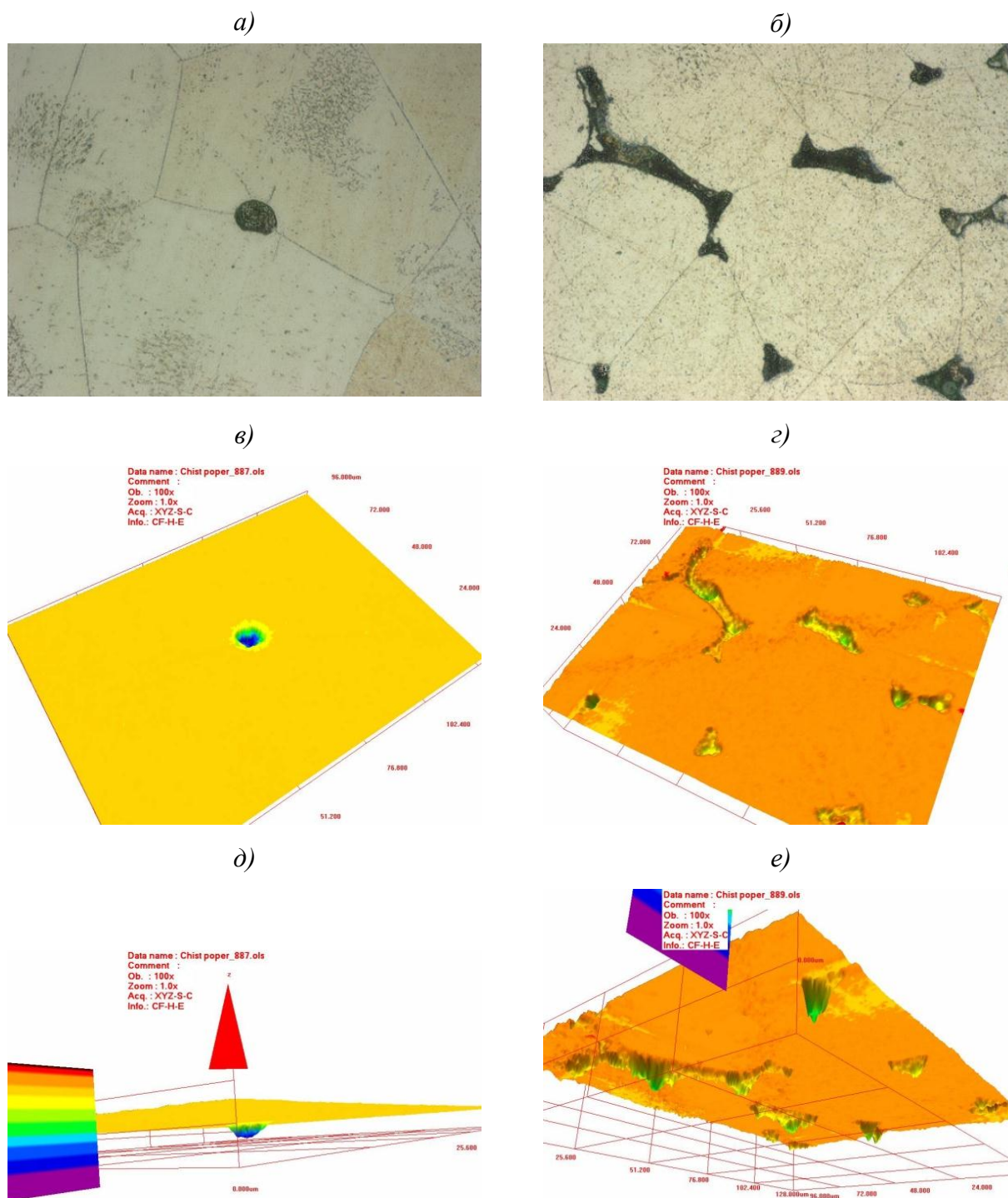


Рисунок 4. Микроструктура образца 3 сплава МЛ10 (Т6):
a, б – съемка в режиме оптического микроскопа; *в–е* – те же кадры в 3D-изображении – виды сверху (*в, з*) и снизу (*д, е*)

Микрорентгеноспектральный анализ образцов из сплава МЛ10 позволил установить, что:

- твердый раствор (зерно) в основном содержит, в % (по массе): Mg – от 93,59 до 98,41; Nd – от 1,59 до 3,23, некоторые спектры показывали содержание Zn – от 0,42 до 0,55 и Zr – от 1,11 до 1,58;

– упрочняющая фаза, расположенная внутри зерна, имеет следующий состав, в % (по массе): Mg≥97,52, Zn – до 0,4; Nd – от 2,72 до 5,31;

– фазы, расположенные по границам зерен, включают следующие элементы, в % (по массе): Mg – от 74,83 до 86,44; Zr – до 18,42; Nd – от 2,4 до 12,06; Zn – до 0,78.

Обсуждение и заключения

Проведенное исследование показало, что при производстве лигатур Mg–Zr и Mg–Zr–Hf следует использовать исходное сырье: фторцирконат калия, карналлит, магниевый сырец высокого качества, а также строго контролировать технологический процесс производства лигатур, что позволит стабилизировать качество лигатуры.

При исследовании микроструктуры образцов из сплава МЛ10, термообработанных по режиму Т6, установлено, что сплав МЛ10 имеет типичную для магниевых сплавов структуру, состоящую из зерен твердого раствора неодима и циркония в магнии. Продукты распада твердого раствора в результате старения в виде мелкодисперсных упрочняющих частиц расположены внутри зерна. Границы зерен на образце 1 четкие, скоплений фазы $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ не обнаружено (в процессе закалки вся фаза $(\text{MgZn})_{12}\text{Nd}$ перешла в твердый раствор).

Увеличение размера зерна (прораствание зерна), выявленное в образце 4, носит локальный характер и, скорее всего, произошло в процессе нагрева отливки под закалку. Это явление может быть вызвано высоким уровнем напряжений в отливках вследствие резкого охлаждения некоторых ее частей при кристаллизации с помощью холодильников. Рост зерна, а следовательно, и снижение механических свойств можно предотвратить, применяя отжиг перед нагревом под закалку или ступенчатый нагрев под закалку.

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. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 20–26.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути //Наука в России. 2012. №3. С. 36–44.
 5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
 6. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
 7. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
 8. Корчагина В.А. Ради качества магниевых отливок //Инженерная газета. 2006. №33–34. С. 5.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов //Металлургия машиностроения. 2005. №6. С. 29–31.
 12. 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.
 13. Дуюнова В.А., Мухина И.Ю., Уридия З.П. Новые противопригарные присадочные материалы для литейных форм магниевых отливок //Литейное производство. 2009. №9. С. 18–21.
 14. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы //Литейное производство. 2013. №5. С. 2–5.
 15. 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.
 16. 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.

17. Мухина И.Ю. Литейные сплавы и техпроцессы при производстве магниевых отливок //Литейное производство. 2003. №4. С. 18–19.
18. 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).
19. Альтман М.Б. и др. Магниевые сплавы. Справочник. М.: Metallurgia. 1978. Т. 2. 147 с.
20. 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).
21. 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).
22. Шишкарева Л.М., Кузьмина Н.А. Обзор методик определения качества структуры монокристаллических отливок жаропрочных сплавов //Труды ВИАМ. 2014. №1. Ст. 06 (viam-works.ru).
23. 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).
24. 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).
25. ОСТ1 90427–94. Качество продукции. Неразрушающий контроль литых деталей и полуфабрикатов авиационной техники из алюминиевых и магниевых сплавов радиографическим методом. Общие положения.
26. ПИ1.2.226–2008. Неразрушающий контроль (НК) металлических изделий рентгеновскими методами.
27. ОСТ1 90121–90. Магниевые литейные сплавы. Режимы термической обработки.
28. ОСТ1 90248–77. Отливки фасонные из магниевых сплавов. Общие технические требования.

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. S. 212–222.
2. Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravlenija razvitija materialov dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki [The main results and the directions of development of materials for perspective aviation engineering] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 20–26.
3. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategičeskikh 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.
4. Kablov E.N. VIAM: prodolzhenie puti [VIAM: way continuation] //Nauka v Rossii. 2012. №3. S. 36–44.
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. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himičeskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
7. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedičeskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
8. Korchagina V.A. Radi kachestva magnievyh otlivok [For the sake of quality of magnesium otlivka] //Inzhenernaja gazeta. 2006. №33–34. S. 5.
9. 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.
10. 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.

11. Muhina I.Ju., Uridija Z.P. Magnij – osnova sverhlegkih materialov [Magnesium – basis of extralight materials] //Metallurgija mashinostroenija. 2005. №6. S. 29–31.
12. Dujunova V.A. Metody zashhity magnievyh splavov v otechestvennom litejnom proizvodstve s 1930-h gg. do nastojashhego vremeni [Methods of protection of magnesium alloys in domestic foundry production since the 1930th so far] //Litejshhik Rossii. 2010. №10. S. 35–37.
13. Dujunova V.A., Muhina I.Ju., Uridija Z.P. Novye protivoprigarnye prisadochnye materialy dlja litejnyh form magnievyh otlivok [New protivoprigarny prisadochny materials for casting molds of magnesium otlivka] //Litejnoe proizvodstvo. 2009. №9. S. 18–21.
14. Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Perspektivnye litejnye magnievye splavy [Perspective cast magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №5. S. 2–5.
15. Dujunova V.A., Goncharenko N.S., Muhina I.Ju., Uridija Z.P., Volkova E.F. Nauchnoe nasledie akademika I.N. Fridljandera. Sovremennye issledovanija magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov v VIAM [Scientific heritage of academician I.N. Fridlyandera. Modern researches of magnesium and cast aluminum alloys in VIAM] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 71–78.
16. Frolov A.V., Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov plavki na strukturu i svojstva novyh magnievyh splavov [Influence of technological parameters of melting on structure and property of new magnesium alloys] //Metallurgija mashinostroenija. 2014. №2. S. 26–29.
17. Muhina I.Ju. Litejnye splavy i tehprocessy pri proizvodstve magnievyh otlivok [Cast alloys and technical processes by production of magnesium otlivka] //Litejnoe proizvodstvo. 2003. №4. S. 18–19.
18. 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).
19. Al'tman M.B. i dr. Magnievye splavy. Spravochnik [Magnesium alloys. Directory]. M.: Metallurgija. 1978. T. 2. 147 s.
20. Uridija Z.P., Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Kosarina E.I. Kontrol' kachestva lit'ja iz magnievyh 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).

21. Leonov A.A., Dujunova V.A., Stupak E.V., Trofimov N.V. Lit'e magnievyh 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).
22. Shishkareva L.M., Kuz'mina N.A. Obzor metodik opredelenija kachestva struktury monokristallicheskih otlivok zharoprochnyh splavov [Review of techniques of determination of quality of structure of single-crystal casting of hot strength alloys] //Trudy VIAM. 2014. №1. St. 06 (viam-works.ru).
23. Postnov V.I., Burhan O.L., Rahmatullin A.Je., Kachura S.M. Nerazrushajushhie metody kontrolja sodержaniya 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).
24. Murashov V.V. Nerazrushajushhij kontrol' zagotovok i detalej iz ugljerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala dlja mnogorazovogo kosmicheskogo korablja «Buran» [Non-destructive testing of preparations and details from carbon-carbon composite material for the reusable «Buran» spacecraft] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 06 (viam-works.ru).
25. OST1 90427–94. Kachestvo produkcii. Nerazrushajushhij kontrol' lityh detalej i polufabrikatov aviacionnoj tehniki iz aljuminievyh i magnievyh splavov radiograficheskim metodom. Obshhie polozhenija [Quality of products. Non-destructive testing of cast details and semi-finished products of aviation engineering from aluminum and magnesium alloys radiographic method. General provisions].
26. PI1.2.226–2008. Nerazrushajushhij kontrol' (NK) metallicheskih izdelij rentgenovskimi metodami [Non-destructive testing (Tax Code) of metal products by x-ray methods].
27. OST1 90121–90. Magnievyje litejnye splavy. Rezhimy termicheskoj obrabotki [Magnesium cast alloys. Modes of thermal processing].
28. OST1 90248–77. Otlivki fasonnye iz magnievyh splavov. Obshhie tehničeskie trebovanija [Casting shaped from magnesium alloys. General technical requirements].