



УДК 669.721.5:669.018.28

DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1

**ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАЗОВЫЕ ФОРМЫ,
ПОЛУЧЕННЫЕ НОВЫМИ МЕТОДАМИ**

А.А. Леонов

В.А. Дуюнова

кандидат технических наук

Е.В. Ступак

Н.В. Трофимов

Декабрь 2014

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 669.721.5:669.018.28

DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1

А.А. Леонов¹, В.А. Дуюнова¹, Е.В. Ступак¹, Н.В. Трофимов¹

ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАЗОВЫЕ ФОРМЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НОВЫМИ МЕТОДАМИ

В статье рассмотрены методы литья отечественных литейных магниевых сплавов (ВМЛ18, ВМЛ20) в разовые формы из песчано-глинистой смеси, холодно-твердеющей смеси и формы, полученные трехмерной печатью. Для форм трехмерной печати были разработаны 3D-модели деталей системы рулевого управления из литейных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20.

Ключевые слова: *литейные магниевые сплавы, разовые формы, песчано-глинистая смесь, холодно-твердеющая смесь, 3D-модели.*

A.A. Leonov, V.A. Dyuunova, E.V. Stupak, N.V. Trofimov

CASTING OF MAGNESIUM ALLOYS IN DISPOSABLE MOULDS PRODUCED BY NEW METHODS

The article considers the methods of casting of domestic castable magnesium alloys (VML18, VML 20) in disposable moulds made of sand-clay mixture, cold box mixture and moulds produced by 3-D printing. 3D-models of parts of the steering system components from magnesium castable VML 18 and VML 20 alloys were developed for the three-dimensional printing.

Keywords: *castable magnesium alloys, disposable moulds, sand-clay mixture, cold box mixture, 3D-models.*

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

Известно, что магниевые сплавы – наиболее легкие конструкционные материалы на металлической основе. Поэтому к ним проявляется повышенный интерес как в России, так и в других странах, таких как Германия, Япония, США, Англия, проводится много конференций и существует большое количество патентов. Объясняется это тем, что магний был и остается практически единственным конкурентом конструкционных пластмасс, а также алюминиевых среднепрочных сплавов, обладая перед ними определенными преимуществами (высокие удельные прочность и жесткость, хорошие усталостные свойства, стабильность механических свойств и размеров при длительном хранении вследствие отсутствия склонности к естественному старению) [1–4].

В ВИАМ за последние годы разработаны два литейных магниевых сплава: высокопрочный коррозионностойкий литейный магниевый сплав ВМЛ18 и высокопрочный литейный магниевый сплав ВМЛ20.

Так как прогресс не стоит на месте, вместе с разработкой магниевых сплавов должны развиваться и методы их литья. В данной статье рассмотрены методы литья магниевых сплавов в разовые формы из песчано-глинистых (ПГС), холодно-твердеющих смесей (ХТС) и формы, полученные трехмерной печатью [5–7].

Большинство деталей изготавливают литьем в ПГС, что экономически выгодно с точки зрения литейщиков, но требует практически 100% механической обработки.

Литье в формы из ХТС позволяет повысить чистоту поверхности отливок, увеличить выход годного, сократить продолжительность производства.

Современное развитие науки и техники позволяет получать детали новыми методами с помощью цифровых технологий (3D-печать форм) для изготовления отливок оптимальной конструкции с высокой точностью размеров и минимальными затратами на последующую механическую обработку, а также со значительным сокращением продолжительности их производства.

Цель работы – сравнение методов литья магниевых сплавов в разовые формы из ПГС, ХТС и формы, полученные трехмерной печатью.

Материалы и методы

Проведены исследования – вычислительный эксперимент, выполненный с использованием математических моделей конструкций, отражающих их физические свойства и построенных на основе конечно-элементных моделей с помощью программных комплексов Catia P3.V5R19 и MSC Patran.

Разработаны 3D-модели деталей системы рулевого управления пассажирского самолета, изготавливаемых литьем в формы из ХТС и в формы, выполненные с помощью цифровых технологий (3D-печать) [8].

Результаты

За годы кризиса авиапрома участки литья из магниевых сплавов на самолетостроительных заводах были закрыты, а детали стали изготавливать либо из сплава АК7п.ч., либо из поковок других алюминиевых сплавов.

При замене магниевых сплавов на алюминиевые масса конструкции увеличилась, что неприемлемо для такого рода техники. На рис. 1 показан пульт управления самолета Ту-204СМ. Желтым цветом выделены детали, которые должны быть изготовлены из магниевых сплавов. Переход на сплав АК7п.ч. привел к увеличению массы конструкции на 11 кг [9, 10].



Рисунок 1. Пульт управления самолета Ту-204СМ

Метод литья магниевых сплавов в ПГС является одним из первых и из вышеперечисленных наиболее распространен. Особенностью данного способа литья является то, что для каждой отливаемой детали готовится форма, которая после заливки и охлаждения металла разбирается. Литье в песчаные формы позволяет получать отливки любой формы, практически неограниченных массы и размеров с наименьшими экономическими и трудовыми затратами. Однако у этого метода есть недостатки: уменьшается точность получаемых размеров, ухудшаются показатели качества отливки и чистота

поверхности, что в связи с высокими требованиями к отливкам является недопустимым [11, 12].

Так как магний и его сплавы склонны к окислению и возгоранию в форме, то в процессе литья деталей в ПГС добавляют противопопригарные присадочные материалы (ППМ). Без них невозможно получать сложные уникальные отливки с высокой чистотой поверхности [13–16].

Сотрудниками ВИАМ разработаны ППМ (ВМ-У, ВМ-У2, ВМ-У3) пониженной гигроскопичности, обеспечивающие:

- предотвращение возгорания отливок;
- повышение чистоты поверхности отливок;
- выход годного до 85% [17–19].

Появление в России новых технологий изготовления оснастки для литья в землю позволяет повысить точность исполнения деталей, улучшить внешний вид, снизить объем механической обработки, уменьшить массу конструкции. На рис. 2 показаны детали, изготовленные по новой и традиционной технологии.

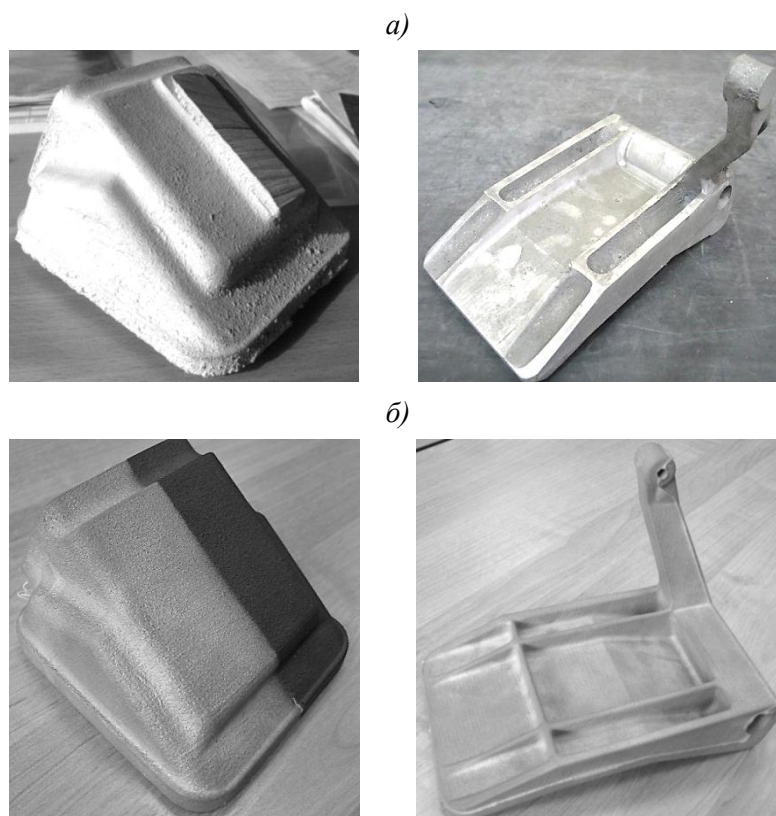


Рисунок 2. Детали, изготовленные в песчаных формах по традиционной (*a*) и новой (*б*) технологиям

Метод ХТС в последнее время становится более распространенным. Если относительно недавно использование холоднотвердеющих смесей носило ограниченный характер из-за ряда ограничений (это, в первую очередь, было связано с закупкой технологий и оборудования за рубежом), то сейчас этот метод начинает занимать более прочное место в отечественном литейном производстве.

Холднотвердеющие смеси являются универсальными, так как позволяют изготавливать отливки не только простой, но и сложной формы, которые с помощью ПГС отлить невозможно. Процесс изготовления отливок в формах из ХТС основывается на свойстве смолы (в смеси с песком) отверждаться в присутствии кислого катализатора. Преимущества этого метода:

- повышение качества отливок;
- возможность автоматического приготовления смесей;
- снижение расходов на производство;
- возможность организации единичного производства отливок;
- совместимость смесей для изготовления стержней и форм.

Основным наиболее существенным недостатком этого метода является токсичность используемых связующих.

Холднотвердеющие смеси возможно получать на основе органических (синтетические смолы) и неорганических материалов (жидкое стекло).

Применение ХТС на основе фенолформальдегидного связующего показало, что высококачественные сложные отливки с высокими требованиями к геометрическим размерам, чистоте поверхности невозможно получить при применении форм из ПГС, так как они не обеспечивают низкой влажности, высокой газопроницаемости, постоянства геометрических размеров.

За рубежом широко применяется метод Cold box amin. Стержни, изготовленные этим методом, обладают достаточно высокой начальной прочностью, высокими технологическими свойствами и точностью геометрических размеров [20].

Метод 3D-печати – самый новый из вышеперечисленных. Оптимизация конструкции деталей из литейных магниевых сплавов включает в себя:

- создание 3D-моделей деталей и сборок;
- анализ прочности существующей конструкции в специализированных прочностных комплексах;
- перепроектирование деталей с учетом новых технологий, позволяющих усложнять конструкцию.

Применение новых магниевых сплавов в сочетании с перечисленным комплексом работ позволяет добиться максимального снижения массы изделий.

В настоящее время ведется разработка 3D-моделей и чертежей деталей системы управления пассажирского самолета, изготавливаемых литьем в формы из холодно-твердеющих смесей и в формы, выполненные с помощью цифровых технологий (3D-печать). На рис. 3 представлены 3D-модели миништурвала, качалки и кронштейна, по которым будут изготовлены отливки в заводских условиях.

Деталь типа «миништурвал» предназначена для управления рулями самолета в ручном режиме. Конструкция детали полая – для размещения кнопок, переключателя и электрожгута. Деталь будет изготовлена из высокопрочного коррозионностойкого литейного магниевого сплава ВМЛ18 системы Mg–Al–Zn.

Детали типа «качалка» и «кронштейн» предназначены для передачи управляющего сигнала на рулевые агрегаты в механическом контуре управления рулями. Для изготовления этих деталей будет использован высокопрочный литейный магниевый сплав ВМЛ20 системы Mg–Zn–Zr [21, 22].

На рис. 4 представлены новые технологии изготовления песчаных форм.

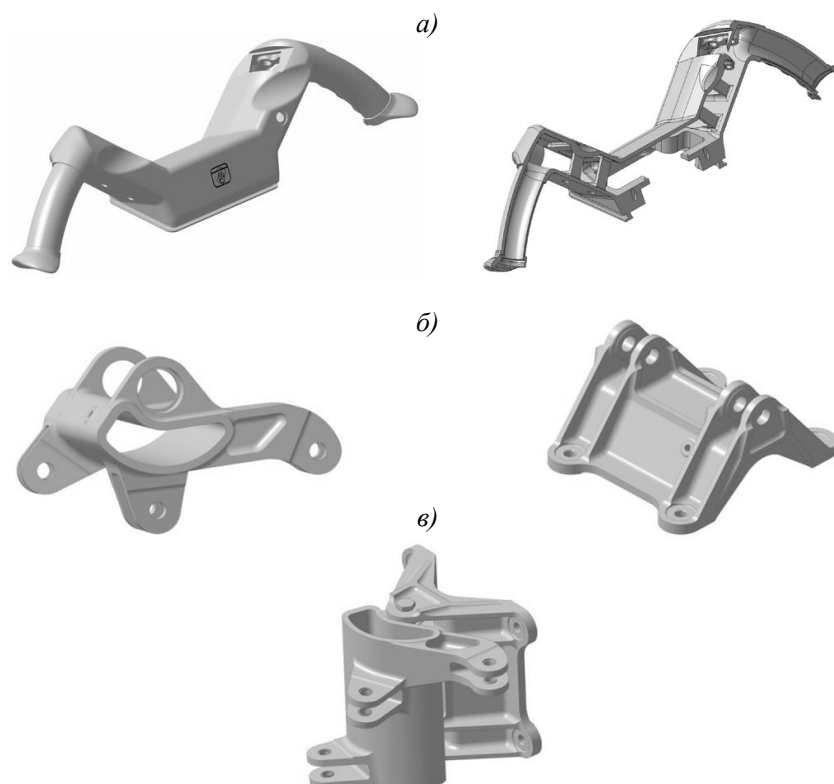


Рисунок 3. 3D-модели деталей системы управления пассажирского самолета:

а – миништурвал (сплав ВМЛ18); *б* – качалка и кронштейн (сплав ВМЛ20); *в* – сборка кронштейна с качалкой для системы управления рулем высоты

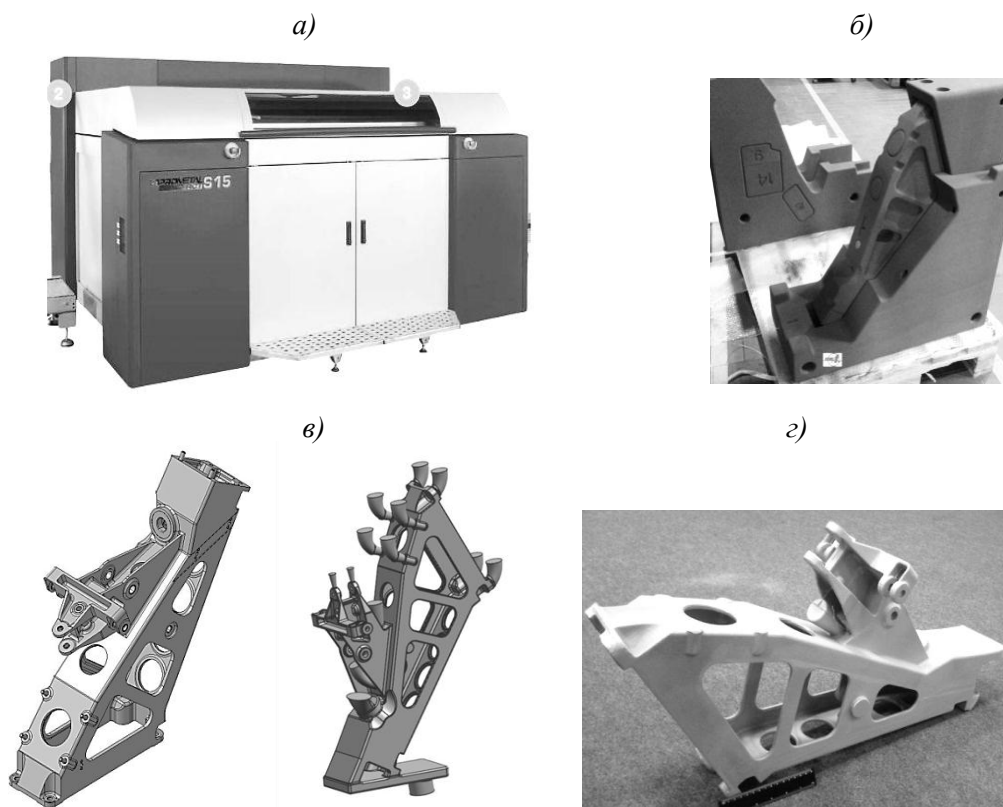


Рисунок 4. Новая технология изготовления песчаных форм:

а – установка S15 для изготовления песчаных форм; *б* – песчаная форма, полученная трехмерной печатью; *в* – 3D-модели детали и отливки; *г* – готовая отливка

Обсуждение и заключения

Применение 3D-технологий при проектировании авиационных конструкций и литейной оснастки в сочетании с использованием новых высокопрочных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 (взамен применяемых в настоящее время серийных сплавов МЛ5п.ч., АК7п.ч., АК4) позволит:

- сократить сроки подготовки производства с нескольких месяцев до нескольких недель;
- снизить массу отливок более чем в 2 раза благодаря повышению точности литья (снижению шероховатости поверхности, уменьшению толщины стенки отливки вследствие повышения прочности формы);
- сократить объем механической обработки деталей в 1,5–2 раза.

Для отливок деталей системы рулевого управления из сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 более точный сравнительный анализ прочности и технологичности можно будет провести после получения опытных отливок в заводских условиях и проведения прочностных испытаний.

Все три метода, описанные в данной статье, продолжают развиваться. Метод литья в ПГС занимает лидирующие позиции, однако и метод литья в ХТС прочно обосновался на российском рынке. Метод 3D-печати – самый «молодой» и перспективный. Благодаря высокой точности изготовления детали методом трехмерной печати уровень механической обработки снизится до 30% относительно серийной технологии изготовления детали.

Авторы выражают благодарность начальнику бригады УФКБ ОАО «Туполев» И.П. Алябьеву за расчет и проектирование 3D-моделей деталей системы рулевого управления для пассажирского самолета из литейных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути //Наука в России. 2012. №3. С. 36–44.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7–17.
7. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 212–222.
8. Гончаренко Е.С., Алябьев И.П., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Технология получения фасонных отливок из технологического герметичного сплава АЛ4МС //Литейщик России. 2014. №7. С. 12–14.
9. 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).

10. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. и др. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ //Цветные металлы. 2013. №9. С. 71–78.
11. Корчагина В.А. Ради качества магниевых отливок //Инженерная газета. 2006. №33–34. С. 5.
12. Дуюнова В.А. Магниевые сплавы: научные исследования Центрального аэрогидродинамического института и Всесоюзного института авиационных материалов. 1930–1935 гг. //История науки и техники. 2012. №10. С. 27–35.
13. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).
14. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 15–20.
15. 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.
16. Дуюнова В.А., Уридия З.П. Исследование воспламеняемости литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr //Литейщик России. 2012. №11. С. 21–23.
17. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
18. 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.
19. 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.
20. Дуюнова В.А., Козлов И.А. Холоднотвердеющие формовочные смеси: перспективы использования при литье магниевых сплавов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №1. С. 41–43.
21. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы //Литейное производство. 2013. №5. С. 2–5.
22. 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.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravlenija razvitija materialov dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki [The main results and directions of development of promising materials for aircraft equipment] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 20–26.
2. Kablov E.N. VIAM: prodolzhenie puti [VIAM: continuation of the path] //Nauka v Rossii. 2012. №3. S. 36–44.
3. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials - the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
4. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhij vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements - materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
7. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primeneniya magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Prospects for the use of magnesium and aluminum foundry alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 212–222.
8. Goncharenko E.S., Aljab'ev I.P., Trapeznikov A.V., Ogorodov D.V. Tehnologija poluchenija fasonnyh otlivok iz tehnologicheskogo germetichnogo splava AL4MS [Technology for producing shaped castings of technological sealed alloy AL4MS] //Litejshhik Rossii. 2014. №7. S. 12–14.
9. Goncharenko E.S., Trapeznikov A.V., Ogorodov D.V. Litejnye aljuminievyje splavy (k 100-letiju so dnja rozhdenija M.B. Al'tmana) [Casting aluminum alloys (for the 100th anniversary of the birth of Mikhail Altman)] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 02 (viam-works.ru).
10. Dujunova V.A., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. i dr. Nauchnoe nasledie akademika I.N. Fridljandera. Sovremennye issledovanija magnievyh i litejnyh aljuminievyh

- splavov v VIAM [Scientific Heritage of Academician I.N. Friedlander. Modern studies of magnesium and cast aluminum alloys VIAM] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 71–78.
11. Korchagina V.A. Radi kachestva magnievyh otlivok [For the sake of the quality of magnesium castings] //Inzhenernaja gazeta. 2006. №33–34. S. 5.
 12. Dujunova V.A. Magnievyje splavy: nauchnye issledovanija Central'nogo ajerogidrodinamicheskogo instituta i Vsesojuznogo instituta aviacionnyh materialov. 1930–1935 gg. [Magnesium alloys: research of the Central hydrodynamic Institute and the All-Union Institute of Aviation Materials. 1930-1935 years.] //Istorija nauki i tehniki. 2012. №10. S. 27–35.
 13. Karimova S.A., Pavlovskaja T.G. Razrabotka sposobov zashhity ot korrozii konstrukcij, rabotajushhijh v uslovijah kosmosa [Development of methods of corrosion protection structures operating in space] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 02 (viam-works.ru).
 14. Kozlov I.A., Karimova S.A. Korrozija magnievyh splavov i sovremennye metody ih zashhity [Corrosion of Magnesium Alloys and modern methods of protection] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 15–20.
 15. 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 the domestic foundry with the 1930s. up to date] //Litejshhik Rossii. 2010. №10. S. 35–37.
 16. Dujunova V.A., Uridija Z.P. Issledovanie vosplamenjaemosti litejnyh magnievyh splavov sistemy Mg–Zn–Zr [Study the flammability of casting magnesium alloys Mg–Zn–Zr] //Litejshhik Rossii. 2012. №11. S. 21–23.
 17. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
 18. Kablov E.N., Muhina I.Ju., Korchagina V.A. Prisadochnye materialy dlja formovochnyh smesej pri lit'e magnievyh splavov [Filler materials for molding compounds for casting magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2007. №5. S. 15–18.
 19. Dujunova V.A., Muhina I.Ju., Uridija Z.P. Novye protivoprigarnye prisadochnye materialy dlja litejnyh form magnievyh otlivok [New antiscorching filler materials for molds magnesium castings] //Litejnoe proizvodstvo. 2009. №9. S. 18–21.
 20. Dujunova V.A., Kozlov I.A. Holodnotverdejushhie formovochnye smesi: perspektivy ispol'zovanija pri lit'e magnievyh splavov [Cold-molding materials: prospects for the

use in the casting of magnesium alloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskiy spravoch-
nik. 2011. №1. S. 41–43.

21. Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Perspektivnye litejnye magnievye splavy [Prospective casting magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №5. S. 2–5.
22. Frolov A.V., Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Uridija Z.P. Vlijanie tehnologicheskikh pa-
ra-metrov plavki na strukturu i svojstva novyh magnievyh splavov [Effect of process
parameters on the structure and melting properties of the novel magnesium alloys]
//Metallurgija mashinostroenija. 2014. №2. S. 26–29.