

УДК 669.018.28:669.721.5

Н.В. Трофимов¹, А.А. Леонов¹, В.А. Дуюнова¹, З.П. Уридия¹

ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-1-1

В зависимости от области применения магниевые сплавы подразделяют на следующие группы: высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие. Данные сплавы по своему назначению относятся к различным системам: Mg–Al–Zn, Mg–Zn–Zr, Mg–PЗМ. Рассмотрены сплавы, относящиеся к вышеперечисленным группам, приведены их основные характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, коррозионная стойкость, предел длительной прочности, ударная вязкость), а также область применения.

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

Ключевые слова: магниевые сплавы, механические свойства, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, коррозионная стойкость, предел длительной прочности, ударная вязкость.

Magnesium alloys in a review article were examined. They are divided, depending on its application, as follows: high strength, heat resistant, corrosion resistant alloys. According to their purpose these alloys belong to different systems: Mg–Al–Zn, Mg–Zn–Zr, Mg–RE. The examples of alloys belonging to the above groups, their basic properties (tensile strength, yield strength, corrosion resistance, long-term strength, impact strength) and application fields were considered in the article.

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» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: magnesium alloys, mechanical properties, tensile strength, yield strength, elongation, corrosion resistance, long-term strength, impact strength.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Повышение требований к изделиям авиационной, космической, военной и других отраслей промышленности приводит к необходимости поиска и разработки современных технологических решений и применения экологически чистых материалов с высокими прочностными свойствами, способных выдержать высокие нагрузки при различных условиях эксплуатации, что позволит повысить безопасность использования и весовую эффективность изделия [1].

В реализации поставленных задач значимую роль играет магний и его сплавы. Основным достоинством магниевых сплавов является их малая плотность при сравнительно высоких прочностных свойствах, что определяет к ним интерес как к легким конструкционным материалам [2]. Применение магниевых сплавов также позволяет

существенно снизить массу изготавливаемых деталей и тем самым улучшить весовые характеристики изделий в целом, а также уменьшить расход топлива. Магний является одним из основных промышленных металлов, но объем его производства продолжает заметно уступать объему производства алюминия и стали [3–5].

Являясь самым легким конструкционным материалом, магниевые сплавы обладают сравнительно высокой химической стойкостью по отношению к щелочам, керосину, бензину и минеральным маслам, способностью к поглощению повышенных ударных нагрузок, а также хорошо обрабатываются резанием. За последние годы в области исследования и разработки магниевых сплавов заметен значительный рост.

В связи с повышением требований к прочностным и ресурсным характеристикам материалов из легких сплавов, в производстве целесообразно использовать новые литейные магниевые сплавы ВМЛ18 и ВМЛ20 с повышенными прочностными и коррозионными характеристиками взамен серийно применяемых сплавов.

В данной работе рассмотрены следующие группы сплавов: высокопрочные, жаропрочные и коррозионностойкие [6].

Характеристики магниевых сплавов

Наиболее широко применяются в технике литейные магниевые сплавы МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ10, МЛ12.

Литейные магниевые сплавы в зависимости от условий эксплуатации подразделяют на три группы:

- высокопрочные магниевые сплавы – пригодны для эксплуатации при температурах от комнатной до 150°C (МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ12);
- сплавы с повышенной коррозионной стойкостью – для работы при температурах от комнатной до 150°C (МЛ5п.ч., МЛ10);
- жаропрочные сплавы – работоспособные при температурах от 200 до 350°C (МЛ10, МЛ9, МЛ19) [7].

Плавка магниевых сплавов

В отличие от других металлов и сплавов (алюминий, цинк, медь) магниевые сплавы в расплавленном состоянии обладают высокой реакционной способностью: они легко образуют соединения с кислородом и азотом воздуха, разлагают пары воды и поглощают водород. В связи с этим плавку магниевых сплавов проводят в тигельных печах под слоем флюса, который, плавясь при более низкой температуре, создает защитный слой, предохраняющий магниевый сплав от соприкосновения с атмосферным воздухом, или в специальных печах без доступа воздуха [8]. При выплавке магниевых сплавов применяют стальные тигли, так как графитовые подвержены разъеданию плавильными флюсами, а шамотные – загрязняют сплав силицидом и оксидом магния.

Флюсы должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь температуру плавления ниже температуры расплавленного металла;
- обладать хорошей рафинирующей способностью (удалять из сплава оксиды и нитриды);
- обладать хорошей жидкотекучестью;
- иметь бóльшую плотность при повышенной температуре (750°C), чем плотность магниевых сплавов при той же температуре.

При изучении процесса удаления твердых неметаллических включений из магниевых сплавов установлено, что при повышении температуры эти включения довольно быстро осаждаются на дно тигля. При температуре 750°C происходит практически полное осаждение из расплава твердых оксидов и нитридов. Улучшение отстаивания

расплава при повышении температуры связано с увеличением разности в плотностях сплава и взвешенных неметаллических частиц.

Более полное удаление твердых неметаллических включений осуществляется посредством обработки сплава расплавленным флюсом. Для ускорения процесса полного удаления неметаллических примесей из расплава его следует перемешивать.

По окончании перемешивания начинается процесс оседания этих частиц на дно тигля. Очищение расплава от взвеси хлоридов и оксидов будет происходить тем полнее, чем меньше поверхностная активность флюса к сплаву, больше его плотность и продолжительность отстаивания расплава. Для полного оседания флюса расплав перегревают (до 850–900°C), при этом вязкость металла уменьшается, а флюсы практически полностью оседают на дно тигля. С другой стороны, при перегреве достигается измельчение структуры сплава, что приводит к улучшению механических свойств отливаемых деталей. Перегрев сплава осуществляют непосредственно в тиглях с последующим охлаждением металла вместе с печью до температуры заливки металла в форму [9–11].

Благоприятное воздействие на измельчение структуры магниевых сплавов оказывает также элементарный углерод, который образуется из газообразных или летучих соединений углерода, вводимых в сплав при температуре 740°C. В настоящее время нашел широкое применение способ модифицирования магниевых сплавов с использованием углекислых кальция и магния.

В США в отдельных случаях процесс плавки магниевых сплавов проводят в нейтральной атмосфере под газовым слоем аргона или в котлах закрытого типа.

В России плавку проводят в обычных плавильных тиглях, закрытых крышкой из стали. Бесфлюсовую плавку магниевых сплавов проводят в открытой печи под защитой элегаза, который обеспечивает получение высококачественных сплавов. Соприкасающиеся поверхности механически обрабатывают для более плотного прилегания крышки к верхним кромкам тигля. Печь оборудована местной отсасывающей вентиляцией. Подача в тигель газа, защищающего металл от окисления, осуществляется периодически из баллона через редуктор, ротаметр и трубопровод, введенный в верхнюю часть тигля через отверстие в крышке. Подгрузку шихты в тигель также проводят через отверстие в крышке [12].

Литье магниевых сплавов

Сплав, готовый к разливке по формам, должен отвечать заданному химическому составу, быть свободным от неметаллических включений – оксидов, нитридов, растворенных газов (водорода) и вредных металлических примесей (щелочных металлов, железа, никеля и др.). Желательно, чтобы потери сплава при его приготовлении были минимальными.

Технологический процесс необходимо проводить в соответствии с физико-химическими особенностями поведения магния.

При нагревании на воздухе магний окисляется и горит. Высокая упругость паров магния (способность к сублимации) делает практически невозможной плавку его сплавов в вакууме. Кислород практически нерастворим в магнии и его сплавах. Образующиеся оксиды магния и легирующих металлов находятся в расплаве как самостоятельная твердая фаза, а упругость их диссоциации в сплаве равна упругости диссоциации свободного оксида. Аналогично ведет себя магний и при взаимодействии с азотом [13, 14].

Вследствие того, что плотность оксида и нитрида магния более высокая по сравнению с плотностью расплава, они оседают на дно металлической ванны. Таким образом, при плавке на воздухе возможно получить расплав, свободный от кислорода, азота и твердых оксидных включений.

Высокая теплота образования оксида магния и низкое значение энергии активации реакции взаимодействия кислорода с магнием обуславливают протекание ее в очень узкой зоне на поверхности контакта реагирующих фаз с большой скоростью. Следовательно, скорость окисления сплава при плавке на воздухе пропорциональна площади поверхности, на которой происходит взаимодействие, т. е. пропорциональна площади поверхности металла в плавильной печи.

Эти особенности позволяют проводить плавку магниевых сплавов в открытых печах при защите шихты от интенсивного окисления, если потери от угара при этом незначительны. При небольшом зеркале металла в печи и малой продолжительности плавления защита от окисления легко достигается путем нанесения на поверхность расплава защитного флюса. Применение флюса позволяет интенсифицировать процесс удаления из сплава оксидов и нитридов.

В настоящее время процесс изготовления магниевых сплавов осуществляется в стационарных тиглях с ковшовым разливом, в выемных тиглях с разливом сплава из этих же тиглей и с использованием дуплекс-процесса, когда твердую шихту расплавляют в одной печи и затем переливают в другую (миксер, раздаточный тигель) для доработки, после чего разливают по формам [15].

Высокопрочные магниевые сплавы

Высокопрочные литейные магниевые сплавы предназначены для эксплуатации при температурах до 150 (длительно) и 200°C (кратковременно). К данной группе можно отнести следующие сплавы: МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ8, МЛ12, МЛ15, ВМЛ18, ВМЛ20.

В настоящее время наибольшее применение в промышленности нашли сплавы МЛ5 и МЛ5п.ч. системы Mg–Al–Zn, обладающие хорошей технологичностью, низкой склонностью к образованию горячих трещин, удовлетворительной коррозионной стойкостью. Сплав МЛ5п.ч. по механическим свойствам аналогичен сплаву МЛ5, однако обладает более высокой коррозионной стойкостью благодаря повышенной чистоте по примесям.

Сплавы МЛ5 и МЛ5п.ч. в основном обрабатываются по режиму Т4. Режим Т6 используется для повышения предела текучести сплавов МЛ8, ВМЛ18 и ВМЛ20, однако при этом снижается их коррозионная стойкость [16].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны:

- коррозионностойкий литейный магниевый сплав ВМЛ18 (аналог сплава МЛ5п.ч.);
- высокопрочный литейный магниевый сплав ВМЛ20 (аналог сплава МЛ8).

Сплав ВМЛ18 системы Mg–Al–Zn обладает повышенными пределами прочности и текучести (на 2 и 40% соответственно), а также повышенной коррозионной стойкостью (в 2,5 раза) по сравнению со сплавом МЛ5п.ч. При термической обработке используют такие же режимы, что и для сплава МЛ5п.ч.

Сплав ВМЛ20 системы Mg–Zn–Zr термообработывают по режимам Т6 и Т61. Сплав ВМЛ20 по сравнению со сплавом МЛ8 (система Mg–Zn–Zr) обладает наиболее высокими значениями пределов прочности и текучести, благодаря чему может быть использован для замены некоторых алюминиевых сплавов при изготовлении отливок. Сплав ВМЛ20 превосходит МЛ8 по временному сопротивлению на 13%, пределу текучести – на 30%.

Сплавы МЛ8, МЛ12, МЛ15, ВМЛ20 обладают следующими преимуществами перед другими конструкционными материалами:

- более высоким пределом текучести при комнатной и высоких температурах;
- повышенным сопротивлением ползучести при длительных выдержках;
- пониженной чувствительностью к надрезу при статическом нагружении;
- повышенной герметичностью.

Основные характеристики сплавов представлены в табл. 1. Свойства приведены для образцов, вырезанных из отливок и термообработанных по применяемым в промышленности режимам [17–19].

Таблица 1

Механические и коррозионные свойства высокопрочных магниевых сплавов

Сплав (режим термообработки)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Коррозионная стой- кость, см ³ /см ²	КСУ, кДж/м ²
	МПа				
МЛ5, МЛ5п.ч. (Т4)	235	90	2	8–12	49
МЛ8 (Т6, Т61)	265–275	170–175	4	–	29,5
МЛ12 (Т1)	230	130	5	–	39
МЛ15 (Т1)	210	130	3	–	20
ВМЛ18 (Т4, Т6)	245–270	125–170	2–8	2,5	80–90
ВМЛ20 (Т6, Т61)	300–310	220–225	4–7	4,5–5,0	40–49

На рис. 1–6 представлены примеры использования высокопрочных литейных магниевых сплавов.

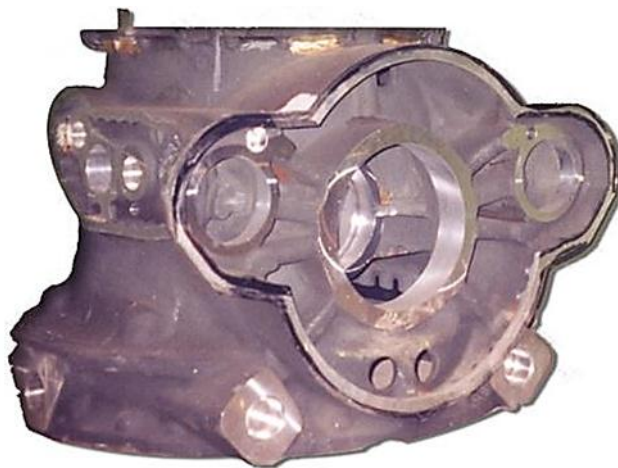


Рис. 1. Корпус редуктора из магниевого сплава МЛ5

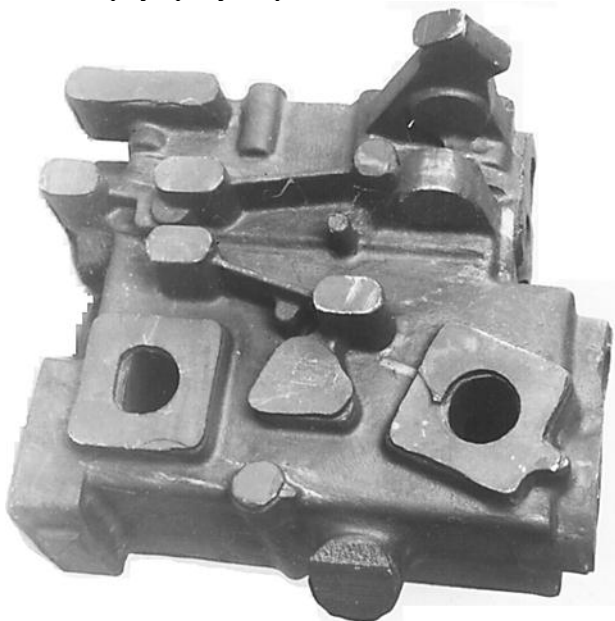


Рис. 2. Корпус редуктора из магниевого сплава МЛ8



Рис. 3. Корпус авиаколеса из магниевого сплава МЛ12

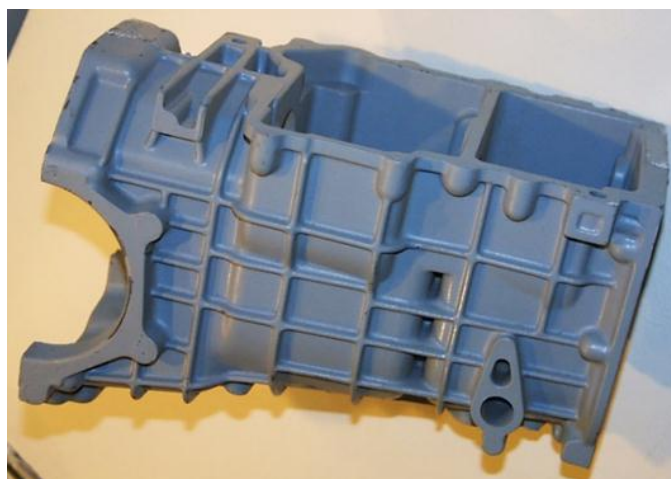


Рис. 4. Корпус редуктора из магниевого сплава МЛ15



Рис. 5. Корпус редуктора вертолета из сплава ВМЛ18



Рис. 6. Фасонные отливки из сплава ВМЛ20

Высокопрочные магниевые сплавы применяются для отливки деталей, используемых в конструкциях самолетов и вертолетов, посадочных устройств, двигателей, агрегатов и приборов других изделий, работающих в условиях длительного и кратковременного нагружения.

Коррозионностойкие магниевые сплавы

Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы предназначены для эксплуатации при температурах до 150 (длительно) и 175°C (кратковременно). К данной группе можно отнести следующие сплавы: МЛ15п.ч., ВМЛ18. Эти сплавы имеют пониженное содержание вредных примесей и повышенную коррозионную стойкость [20]. Основные характеристики сплавов представлены в табл. 1.

Коррозионностойкие магниевые сплавы применяются для изготовления деталей и изделий авиакосмической промышленности и машиностроения (приборы, агрегаты, корпусные отливки насосы, помпы, картеры, маслоотстойники, крышки блоков, кронштейны, фермы, рамы) [21].

Жаропрочные магниевые сплавы

Жаропрочные литейные магниевые сплавы предназначены для эксплуатации в условиях нагрева до 250–300 (длительно) и 350–400°C (кратковременно). К данной группе можно отнести следующие сплавы: МЛ9, МЛ10, МЛ19, ВМЛ25.

Жаропрочные сплавы практически не склонны к образованию микрорыхлот в отливках и отличаются высокой герметичностью. Благодаря присутствию циркония, эффективно измельчающему зерно, отливки по всему сечению обладают однородными механическими свойствами.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разрабатывается новый жаропрочный литейный магниевый сплав марки ВМЛ25, который характеризуется повышенными характеристиками прочности и жаропрочности. Паспортизация сплава будет осуществлена в 2016 г.

Основные характеристики сплавов представлены в табл. 2. Свойства приведены для образцов, вырезанных из отливок и термообработанных по применяемым в промышленности режимам [22].

Таблица 2

Механические свойства жаропрочных магниевых сплавов

Сплав (режим термообработки)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{100}^{250}	δ , %
	МПа			
МЛ9 (Т6)	230	110	78,5	4
МЛ10 (Т6)	230	140	69	3
МЛ19 (Т6)	220	120	113	3
ВМЛ25 (Т61)	270	180	100	2,5

На рис. 7–9 представлены примеры использования жаропрочных литейных магниевых сплавов.

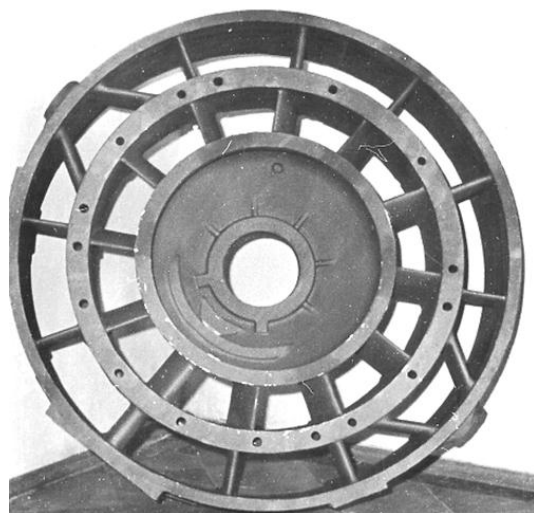


Рис. 7. Корпус передней опоры из магниевого сплава МЛ19



Рис. 8. Крышка из магниевого сплава МЛ10

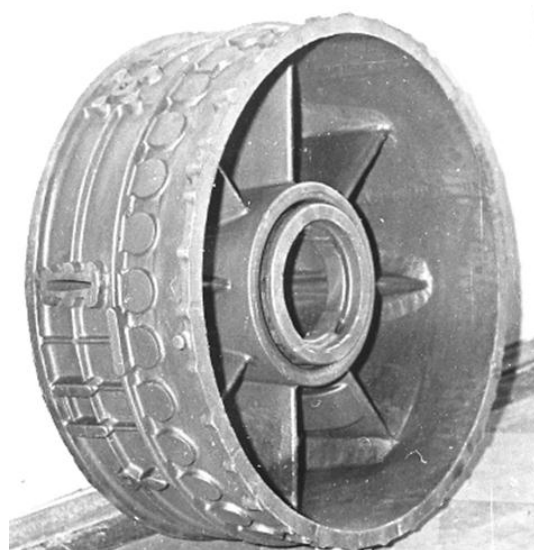


Рис. 9. Крышка из магниевого сплава МЛ19

Жаропрочные магниевые сплавы не содержат в своем составе радиоактивных и токсичных добавок. Эти сплавы применяются для изготовления деталей самолетов, вертолетов, двигателей, приборов, маслоагрегатов, редукторов и других конструкций, работающих при повышенных температурах.

Заключение

Основными преимуществами литейных магниевых сплавов как конструкционного материала являются их малая плотность, высокая способность к поглощению вибрационных нагрузок и удельная теплоемкость. Важным технологическим свойством является их отличная обрабатываемость резанием.

К недостаткам магниевых сплавов относится их повышенная химическая активность и, как результат, сравнительно невысокая коррозионная стойкость. Однако при надлежащей защите деталей и изделий из магниевых сплавов они могут надежно работать во всеклиматических условиях [23, 24].

Для эффективного применения магниевых сплавов необходимо строгое соблюдение принципов конструирования, а также знание особенностей их физических и механических свойств по сравнению со свойствами других конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // Наука в России. 2012. №3. С. 36–44.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2016).
6. 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.
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. №S. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-3-3.
10. 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.
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: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2016).

14. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 15–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-15-20.
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.
23. Уридия З.П., Мухина И.Ю., Фролов А.В., Леонов А.А. Исследование микроструктуры магниевое-циркониевой лигатуры и жаропрочного литейного магниевого сплава МЛ10 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-1-1.
24. 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: 28.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1.