



УДК 669.721.5:546.65

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-7-7

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И
СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ
МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

А.В. Фролов

И.Ю. Мухина
кандидат технических наук

В.А. Дуюнова
кандидат технических наук

З.П. Уридия
кандидат технических наук

Сентябрь 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 669.721.5:546.65

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-7-7

А.В. Фролов¹, И.Ю. Мухина¹, В.А. Дуюнова¹, З.П. Уридия¹

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ЖАРОПРОЧНОСТЬ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С развитием техники значительно повысились рабочие температуры эксплуатации изделий, поэтому создание литейных магниевых сплавов с высокими прочностными и жаропрочными характеристиками весьма актуальная задача, стоящая перед разработчиками. Достижение повышенных прочностных и жаропрочных свойств литейных магниевых сплавов осуществляется путем легирования перспективными элементами, включая выбор и оптимизацию режимов термической обработки. Перспективным может быть комплексное легирование несколькими РЗМ иттриевой (Y, Nd) и цериевой (Ce, La, Pr) подгрупп в разных соотношениях. Дорогостоящие РЗМ, такие как эрбий, гадолиний, самарий и др., могут быть опробованы в качестве микродобавок, улучшающих жаропрочные характеристики сплава. Рассмотрены некоторые особенности поведения литейных магниевых сплавов при повышенных температурах и влияние легирования на их свойства. Показано влияние температуры и продолжительности выдержки при старении магниевых сплавов, легированных редкоземельными металлами, на твердость.

Ключевые слова: *литейные жаропрочные магниевые сплавы, легирование редкоземельными элементами.*

A.V. Frolov, I.Yu. Mikhina, V.A. Duyunova, Z.P. Uridiya

THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS AND STRUCTURAL FACTORS ON THE RESISTANCE OF MAGNESIUM ALLOYS

With the progress of engineering, the operating temperature of articles was greatly increased; therefore, creation of casting magnesium alloys with high strength and heat-resistant characteristics is very an urgent task, to which researchers are faced. Provi-

sion of high strength and heat resistant properties of cast magnesium alloys can be achieved due to alloying with promising elements, including selection and optimization of thermal processing conditions. An integrated doping of several rare-earth metals of yttrium (Y, Nd) and cerium (Ce, La, Pr) subgroups in different proportions can be perspective. Expensive rare-earth metals such as erbium, gadolinium, samarium and others can be tested as microadditives improving heat-resistant characteristics of the alloy. In this article some peculiarities of behavior of cast magnesium alloys at elevated temperatures and the influence of doping on their properties were considered. It shows the influence of temperature and duration of soaking duration of aging magnesium alloys doped with rare earth metals, on hardness.

Keywords: casting heat-resistant magnesium alloys, alloying rare earth elements.

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

Основными достоинствами магниевых сплавов являются высокие механические свойства при малой плотности, хорошая способность к восприятию и поглощению ударных и вибрационных нагрузок, отличная обрабатываемость резанием, что позволяет применять их в конструкциях авиакосмической техники, спутников системы ГЛОНАСС, энергетических и газоперекачивающих установок, оптических приборов и др. [1–4].

С развитием техники значительно повысились рабочие температуры при эксплуатации изделий, поэтому создание литейных магниевых сплавов с высокими прочностными и жаропрочными характеристиками является актуальной задачей.

В мировой практике проводятся исследования в области литейных магниевых сплавов, имеющих достаточно высокий уровень механических свойств при повышенных температурах. Ведущие страны мира, такие как Англия, Япония, США, Корея, Китай, активно занимаются разработкой жаропрочных магниевых сплавов, используя для достижения требуемых характеристик редкоземельные металлы в количестве от 0,3 до 15% (по массе): церий, празеодим, лантан, неодим, иттрий, самарий, лютеций, гадолиний, гольмий, диспрозий, эрбий [5–8].

Широко применяющиеся в России и за рубежом высокопрочные литейные магниевые сплавы на основе систем Mg–Al–Zn и Mg–Zn–Zr (МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ12, AZ91, ZK61) используются для работы при температурах до 150°C. Характерной особенно-

стью этих сплавов является резкое снижение жаропрочных характеристик при повышении температуры, происходящее вследствие возникновения процессов, изменяющих структуру сплава, и проявляющееся в следующем:

- изменяются количество и структура зон Гинье–Престона;
- происходит структурное изменение метастабильных образований и рост частиц стабильных фаз;
- уменьшается суммарная протяженность границ вследствие коагуляции и сфероидизации частиц вторых фаз;
- выравнивается концентрация легирующих элементов внутри зерен твердого раствора;
- уменьшаются внутренние напряжения кристаллической решетки.

Во всех этих процессах главную роль играют так называемые явления переноса – в основном диффузия и теплопроводность [9].

Материалы и методы

Прочность и устойчивость кристаллической решетки при повышенных температурах в большей степени зависит от наличия в ней дефектов, к которым относятся и вакансии.

При закалке сплава диффузионные процессы протекают не полностью, в результате чего фиксируется избыточная концентрация вакансий (по сравнению с равновесной), т. е. пересыщение ими сплава. Избыточная концентрация вакансий снижает жаропрочность сплавов, так как способствует активации диффузионных процессов при рабочих температурах и старении, при этом концентрация вакансий уменьшается за счет их исчезновения в стоках. Вакансии перемещаются (мигрируют) в кристаллической решетке твердого раствора, при этом их миграция непосредственно связана с самодиффузией атомов основы сплава: скорость и величина потока (т. е. количество перемещающихся вакансий) резко возрастают с повышением температуры. Стоками вакансий, т. е. местами их преимущественной миграции, являются свободные поверхности, дислокации, границы зерен и блоков. Большое скопление вакансий в стоках может привести к образованию микротрещин и последующему разрушению сплава под действием относительно небольших напряжений.

В работе [10] показано, что при деформировании особенно много вакансий возникает вблизи плоскостей скольжения: чем выше температура воздействия внешних сил, тем в большей степени нарушается правильность кристаллического

строения материала.

Концентрация вакансий в сплаве, а также их распределение и аннигиляция в стоках влияют на скорость процессов, протекающих при старении закаленных магниевых сплавов (как на кинетику процесса образования продуктов распада твердого раствора, так и на их распределение). Кроме того, вакансии и их скопления могут быть «ловушками» для атомов легирующих элементов и примесей, особенно тех, которые имеют значительно больший размер, чем атомы матрицы. Это может привести к повышенной локальной концентрации некоторых легирующих и примесных элементов.

Вторым важным типом несовершенства кристаллической решетки являются дислокации, т. е. смещения атомных слоев в процессе охлаждения после кристаллизации металла. Они возникают также при пластической деформации металла.

Дислокации в литых сплавах образуются в процессе кристаллизации непосредственно у фронта кристаллизации, а также при охлаждении кристаллитов. Плотность дислокаций может достигать величины 10^{10} – 10^{12} см⁻² (для обычных отожженных поликристаллов она составляет, как правило, 10^7 – 10^8 см⁻²).

Дислокации могут перемещаться в кристаллической решетке под действием небольших напряжений, что вызывает локальную деформацию ее участков. С повышением температуры увеличиваются количество и скорость перемещающихся дислокаций по зернам твердого раствора, в результате чего жаропрочность сплава сильно снижается.

Чем меньше примесных атомов содержится в кристаллической решетке твердого раствора и более гомогенна структура сплава, тем выше подвижность дислокаций, а следовательно, ниже его жаропрочность. Движение дислокаций зависит от многих тормозящих факторов: скопления вакансий; примесей в виде чужеродных атомов, входящих в решетку основы сплава; зон Гинье–Престона; метастабильных фаз, когерентно связанных с матрицей; ультрадисперсных частиц вторых фаз.

Особенно высокую жаропрочность можно ожидать у тех гетерогенных сплавов, в которых мельчайшие устойчивые частицы вторых фаз имеют достаточно большую плотность по всему объему зерна.

Экспериментально установлено, что для обеспечения высоких значений жаропрочности материала и предела текучести расстояние между твердыми частицами вторых фаз должно быть значительно меньше 0,01 мм [11, 12].

Одним из решающих факторов повышения жаропрочности является упрочне-

ние межзеренных границ разветвленными частицами устойчивых вторых фаз. Сама по себе граница зерна является весьма эффективным барьером для движущихся дислокаций, так как вследствие упругих искажений, вызванных различной ориентировкой зерен по отношению друг к другу, дислокация не может свободно перейти в соседнее зерно и останавливается на границе. На границах образуется скопление дислокаций, скользящих в определенных плоскостях. Образующиеся плоскостные сдвиги при пластической деформации сплавов перемещаются в соседнее зерно вследствие возникших от нагромождения дислокаций напряжений, упруго распространяющихся через границу и приводящих в действие источники Франка–Рида* в соседнем зерне. Роль границ зерен как барьеров значительно уменьшается при повышении температуры, поэтому необходимо укрепление границ частицами вторых фаз, которые устойчивы к высоким температурам, при этом они не должны быть крупнокристаллическими концентраторами напряжений.

Академик С.Т. Кишкин [13] считал, что снижение длительной прочности во всех случаях поведения кристаллических тел под нагрузкой в области высоких температур связано с образованием и развитием трещин по границам зерен.

Образование пересыщенного твердого раствора на основе магния и его распад играют большую роль в формировании структуры магниевых сплавов, содержащих РЗМ, и во многом определяют их свойства. Способность образовывать пересыщенный твердый раствор связана с растворимостью РЗМ в твердом магнии, которая уменьшается при понижении температуры.

В распаде пересыщенного твердого раствора сплавов магния с различными РЗМ имеются общие черты и различия. На изменение свойств сплавов различных систем при распаде оказывает влияние различная растворимость РЗМ в твердом магнии, которая изменяется в широких пределах. Упрочнение магниевых сплавов происходит благодаря появлению дисперсных частиц, выделяющихся из твердого раствора в процессе старения и являющихся препятствиями, тормозящими движение дислокаций в условиях ползучести. Высокая жаропрочность достигается при создании гетерофазной мелкодисперсной тонкой структуры [5].

На сплавах магния с неодимом была проверена возможность протекания процессов распада твердого раствора при комнатной температуре (естественное старение) [14, 15].

* Источники дислокаций Франка–Рида – источник, генерирующий дислокации в одной или нескольких атомных плоскостях.

Проведены исследования [16] и измерена твердость пересыщенного твердого раствора (при распаде) в сплавах трех систем: Mg–Nd, Mg–Gd и Mg–Lu (РЗМ, входящие в состав этих сплавов, расположены в начале, середине и конце ряда лантана). Определено, что при увеличении продолжительности старения происходит повышение твердости сплавов до максимального значения, а затем ее постепенное снижение, что типично для процесса распада пересыщенного твердого раствора. При самой низкой температуре старения (150°C) максимум твердости достигается через 30 ч. Повышение температуры старения приводит к ускорению распада пересыщенного твердого раствора, а максимум твердости смещается в сторону меньших значений продолжительности выдержки и при 200°C достигается через ~3 ч, т. е. быстрее в ~10 раз (значения максимума твердости соответствуют значения, полученным в процессе старения при 150°C). Общий ход кривых изменения твердости при 250 и 300°C свидетельствует о том, что максимум твердости при этих температурах старения достигается после выдержки не более 2 ч, при этом значения максимумов твердости, по-видимому, оказываются более низкими, чем значения, полученные после старения при температурах 150 и 200°C.

Скорость распада пересыщенного твердого раствора в сплавах магния с РЗМ различная. Выявлены определенные закономерности распада, которые зависят от атомного номера элементов.

Для сплавов, легированных элементами *цериевой подгруппы* (от лантана до самария), начиная с наименьших значений продолжительности выдержки (45 мин), твердость, непрерывно возрастая, достигает максимума, а затем снижается. Для сплавов с элементами *иттриевой подгруппы* (от гадолиния до тулия и иттрия) в изменении твердости при увеличении продолжительности старения прослеживаются две стадии. На первой стадии происходит небольшое повышение твердости, после чего она устанавливается и остается на постоянном уровне, на второй – твердость возрастает существенно и, достигая своего максимума, снижается.

Для практического использования магниевых сплавов с РЗМ большое значение имеет то, какое влияние оказывают на их свойства другие легирующие элементы. Дополнительное легирование предполагает определенное улучшение механических, технологических и других характеристик сплавов.

Проведены исследования механических свойств сплавов системы Mg–Nd, дополнительно легированных марганцем. Установлено, что добавка марганца приво-

дит к повышению прочностных характеристик, причем возрастание предела текучести выражено более четко, чем предела прочности. Длительная прочность за 100 ч при 200 и 250°C при введении в сплавы, содержащие 2,5–3,0% (по массе) Nd, ~1,5% (по массе) Mn, возрастает на 5–15 МПа. Пластичность сплавов при легировании их марганцем практически не изменяется [17].

В соответствии с имеющимися данными о строении тройных диаграмм состояния Mg–РЗМ–Mn повышение прочности магниевых сплавов с РЗМ при введении в них марганца следует объяснить появлением в структуре весьма прочной и жаропрочной марганцовистой фазы. Эта фаза после обработки на твердый раствор и старение должна выделяться из пересыщенного твердого раствора на основе магния в виде дисперсных частиц [18].

Легирование магния цирконием приводит к значительному измельчению зерна в литом состоянии. Этот эффект связан с характером кристаллизации сплавов системы Mg–Zr и близостью параметров кристаллических решеток магния и циркония. Модифицирующее действие циркония на литую структуру имеет место и в сплавах магния с РЗМ. Стандартной является концентрация 0,4–0,6% (по массе) Zr, хотя модифицирующий эффект наблюдается уже при 0,2% (по массе) Zr. Добавка циркония к сплавам магния с РЗМ улучшает их литейные свойства [18, 19].

Во многих случаях при использовании нескольких РЗМ в качестве легирующих добавок они вводятся совместно [20]. Одним из примеров совместного введения нескольких РЗМ при легировании является использование мишметалла. При легировании магния неодимом используется совместное введение нескольких РЗМ, так как технический неодим может содержать значительное количество других РЗМ (в основном – празеодим). Совместное введение нескольких РЗМ в этих случаях экономически выгодно и связано с тем, что сплавы РЗМ являются более дешевыми, чем отдельные элементы. В ряде случаев совместное введение в магниевые сплавы нескольких РЗМ оказывается целесообразным, так как позволяет улучшить их свойства.

Наиболее подробно исследовано влияние на механические свойства магниевых сплавов совместного легирования различными элементами из числа первых РЗМ ряда лантана (лантана, церия, празеодима и неодима).

Проведены исследования механических свойств литых сплавов, содержащих легирующие элементы в различных сочетаниях: неодим и церий или неодим и мишметалл, в состав сплавов входил также цирконий в количестве 0,5% (по массе).

Показано, что увеличение содержания неодима при одновременном уменьшении

содержания церия или лантана приводит к повышению прочностных характеристик.

Установлено, что сплав, содержащий две части неодима и одну часть мишметалла, ненамного уступает по свойствам сплаву, легированному только неодимом, и поэтому может представлять интерес для практического использования как более дешевый [21, 22].

В работе [23] исследована возможность замены неодима мишметаллом или церием в прессованных сплавах и получены результаты, аналогичные результатам работы [21], выполненной на литых сплавах.

Общий вывод по результатам исследований совместного введения в магниевые сплавы каких-либо из четырех первых элементов ряда лантана следующий: уровень достигаемых прочностных свойств определяется в основном растворимостью РЗМ в твердом магнии. Увеличение количества неодима, более растворимого в твердом магнии, способствует повышению прочностных свойств сплавов, и напротив, снижение его содержания при увеличении менее растворимых церия и лантана способствует снижению характеристик прочности.

Исследованы механические свойства магниевых сплавов [16], в которые совместно вводили иттрий и скандий: 1–8% (по массе) Sc при 11% (по массе) Y и 1–8% (по массе) Y при 11% (по массе) Sc, в состав сплавов также входило 0,6% (по массе) Mn. Свойства сплавов определялись в горячепрессованном состоянии. Установлено, что добавки скандия к сплаву Mg–11Y–0,6Mn приводят к повышению прочностных характеристик при комнатной и повышенных (до 300°C) температурах. При температуре испытания 350°C прочностные характеристики сплавов при введении скандия практически не изменяются. Легирование сплава Mg–11Sc–0,6Mn иттрием привело к повышению прочностных свойств при всех температурах испытания – от комнатной до 350°C.

Обсуждение и заключения

Снижение жаропрочных характеристик литейных магниевых сплавов, наблюдаемое при эксплуатации сплавов в условиях повышенных температур, происходит вследствие возникновения процессов диффузии, изменяющих их структуру. Активации процессов диффузии способствует пересыщение сплавов вакансиями, которые, мигрируя, вызывают самодиффузию атомов основы сплава, причем с повышением температуры поток вакансий резко возрастает.

Другим важным фактором, влияющим на жаропрочность магниевых сплавов,

являются дислокации. С увеличением температуры растет количество перемещающихся дислокаций и скорость их перемещения по зернам твердого раствора, в результате чего жаропрочность сплава резко понижается. Особо высокую жаропрочность можно ожидать у сплавов, содержащих больше примесей в кристаллической решетке твердого раствора (например, гетерогенных сплавов), в которых мельчайшие устойчивые частицы вторых фаз имеют достаточно большую плотность по всему объему зерна. Для обеспечения высоких жаропрочных характеристик материала необходимо иметь расстояние между твердыми частицами вторых фаз значительно меньше 0,01 мм.

Твердые частицы вторых фаз появляются при распаде пересыщенного твердого раствора, который происходит в процессе старения сплава. Повышение температуры старения приводит к ускорению распада пересыщенного твердого раствора, причем для сплавов магния с неодимом, гадолинием и лютецием при 200°C распад происходит в 10 раз быстрее, чем при 150°C.

Большое влияние на свойства магниевых сплавов с РЗМ оказывают легирующие элементы. Добавление марганца в сплав системы Mg–Nd приводит к повышению прочностных характеристик, причем возрастание предела текучести выражено более четко, чем предела прочности. Легирование магния цирконием приводит к значительному измельчению зерна в литом состоянии и улучшению литейных свойств.

Часто при использовании в качестве легирующих добавок нескольких РЗМ они вводятся совместно. Это обусловлено экономической выгодой (сплавы РЗМ являются более дешевыми, чем отдельные элементы), но чаще такое легирование целесообразно с точки зрения достижения лучших свойств сплава.

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. 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. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы приме-

- нения магниевых и литейных алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 212–222.
4. Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 28–34.
 5. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Фролов А.В., Уридия З.П. Влияние легирования РЗМ на жаропрочность литейных магниевых сплавов //Металлургия машиностроения. 2014. №5. С. 34–38.
 6. 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).
 7. 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).
 8. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
 9. Салли И.В. Физические основы формирования структуры сплавов. М.: Metallurgizdat. 1963. 219 с.
 10. Mott N.F. A theory of work-hardening of metals II: flow without slip-lines, recovery and creep //Philos. Mag. 1953. V. 44. P. 742–765.
 11. Сплав на основе магния и изделие, выполненное из него: пат. 2318031 Рос. Федерация; опубл. 27.02.08.
 12. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы: Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
 13. Уманский Я.С., Кишкин С.Т. и др. Физическое металловедение. М.: Metallurgizdat. 1955. 721 с.
 14. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
 15. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов //Литейное производство. 2011. №12. С. 12–14.
 16. Рохлин Л.Л. Магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы. М.: Наука. 1980. 190 с.

17. Grube K., Davis A., Eastwood L.W. Alloying of magnesium alloys //Proc. ASTM. 1950. V. 50. P. 965–988.
18. Флюс для плавки магниевых сплавов: пат. 2283887 Рос. Федерация; опубл. 20.09.06.
19. Murphy A.L, Payne R.I. M. High-strength light alloys //J. Inst. Metals. 1946. V. 75. №3. P. 105–127.
20. 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).
21. Leontis T.E., Feisel D.H. Use rare-earth metals in alloying //J. Metals. 1957. V. 9. №10. P. 1245–1252.
22. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
23. Pashak J.F., Leontis T.E. Magnesium alloys containing rare earth metals //Trans. Metallurg. Soc. AIME. 1960. V. 218. №1. P. 102–107.

REFERENCES LIST

1. 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.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategičeskijh 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. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primeneniija magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Perspectives of application of magnesium and cast aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 212–222.
4. Volkova E.F., Muhina I.Ju. Novye materialy na magnievoj osnove i vysokoresursnyje tehnologii ih proizvodstva [New materials on magnesium basis and high-resource technologies of their production] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №2. S. 28–34.
5. Muhina I.Ju., Dujunova V.A., Frolov A.V., Uridija Z.P. Vlijanie legirovaniija RZM na zharoprochnost' litejnyh magnievyh splavov [Influence of alloying of RZM on thermal stability of cast magnesium alloys] //Metallurgija mashinostroeniija. 2014. №5. S. 34–38.

6. 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).
7. 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).
8. Erasov V.S., Nuzhnyj G.A., Grinevich A.V., Terehin A.L. Treshhinostojkost' aviacionnyh materialov v processe ispytaniya na ustalost' [Treshchinostoykost of aviation materials in the course of fatigue test] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 06 (viam-works.ru).
9. Salli I.V. Fizicheskie osnovy formirovaniya struktury splavov [Physical bases of forming of structure of alloys]. M.: Metallurgizdat. 1963. 219 s.
10. Mott N.F. A theory of work-hardening of metals II: flow without slip-lines, recovery and creep //Philos. Mag. 1953. V. 44. P. 742–765.
11. Splav na osnove magnija i izdelie, vypolnennoe iz nego [Magnesium-based alloy and the product which has been executed of it]: pat. 2318031 Ros. Federacija; opubl. 27.02.08.
12. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy: Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
13. Umanskij Ja.S., Kishkin S.T. i dr. Fizicheskoe metallovedenie [Physical metallurgical science]. M.: Metallurgizdat. 1955. 721 s.
14. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovaniya strukturno-fazovogo sostojaniya materialov [Application of methods of analytical microscopy and the rentgenostrukturny analysis for research of structural and phase condition of materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).
15. Muhina I.Ju. Struktura i svojstva novyh litejnyh magnievyh splavov [Structure and properties of new cast magnesium alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №12. S. 12–14.
16. Rohlin L.L. Magnievyje splavy, sodержashhie redkozemel'nye metally [The magnesium alloys containing rare earth metals]. M.: Nauka. 1980. 190 s.
17. Grube K., Davis A., Eastwood L.W. Alloying of magnesium alloys //Proc. ASTM. 1950. V. 50. P. 965–988.
18. Fljus dlja plavki magnievyh splavov [Gumboil for melting of magnesium alloys]: pat. 2283887 Ros. Federacija; opubl. 20.09.06.

19. Murphy A.L, Payne R.I. M. High-strength light alloys //J. Inst. Metals. 1946. V. 75. №3. P. 105–127.
20. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
21. Leontis T.E., Feisel D.H. Use rare-earth metals in alloying //J. Metals. 1957. V. 9. №10. P. 1245–1252.
22. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij uklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. №4. S. 2–7.
23. Pashak J.F., Leontis T.E. Magnesium alloys containing rare earth metals //Trans. Metallurg. Soc. AIME. 1960. V. 218. №1. P. 102–107.