

УДК 669.721.5

*И.В. Мостяев<sup>1</sup>, М.В. Акинина<sup>1</sup>***ОСОБЕННОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-41-48

*Представлен обзор технического уровня и тенденций развития в области термической обработки магниевых сплавов. Показано, что ведутся разработки новых магниевых сплавов, содержащих элементы из группы РЗМ, и создаются основы новых технологий их изготовления, при этом широко используется механизм воздействия термической обработки на структуру и прочностные свойства сплавов. Приведена зависимость повышения характеристик магниевых сплавов от состава конкретного сплава с применением определенных режимов термической обработки.*

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, термическая обработка, термически обрабатываемые магниевые сплавы, закалка, старение, отжиг, гомогенизация, механические свойства.

*I.V. Mostyaev<sup>1</sup>, M.V. Akinina<sup>1</sup>***FEATURES AND DEVELOPMENT TRENDS IN THE FIELD  
OF HEAT TREATMENT OF MAGNESIUM ALLOYS (review)**

*The paper presents the review of the technical level and development trends in the field of heat treatment of magnesium alloys is presented. It is shown that new magnesium alloys containing elements from the REE group are being developed, and the foundations of new technologies for their manufacture are being created, while the mechanism of the effect of heat treatment on the structure and strength properties of alloys is widely used. The dependence of the increase in the characteristics of magnesium alloys on the composition of a particular alloy with the application of certain heat treatment regimes is given.*

**Keywords:** magnesium alloys, heat treatment, heat-treatable magnesium alloys, quenching, aging, annealing, homogenization, mechanical properties.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Магниевые сплавы с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности являются перспективными наиболее легкими конструкционными материалами, обладающими по сравнению с другими металлическими конструкционными материалами рядом преимуществ: малой плотностью, высокими удельной прочностью и удельной жесткостью, хорошими демпфирующими характеристиками, сопротивлением усталости и технологичностью. За рубежом и в России эти сплавы находят применение в различных современных отраслях техники: электронике, автомобильной промышленности, авиационной промышленности, медицине и т. д. Этим объясняется растущий интерес со стороны разработчиков к магниевым сплавам [1–8].

Деформируемые магниевые сплавы успешно применяются для элементов конструкций, подвергающихся эксплуатационному нагреву, для изготовления деталей системы управления и внутреннего силового набора современных летательных аппаратов. В зарубежных изделиях для этих целей применяют деформируемые магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ): иттрий, неодим (сплавы WE43, WE54), а также дорогостоящие РЗМ: гадолиний, диспрозий (сплав Electron 675, разработчик Magnesium Electron Limited, Великобритания) [9].

Для создания нового поколения изделий авиационно-космической техники требуются сплавы с повышенными прочностными характеристиками, не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам. Использование новых материалов позволит повысить весовую эффективность на 15–20%, увеличить безопасность полетов за счет повышения надежности конструкции, улучшить летные характеристики авиационных и космических изделий, поможет исключить необходимость приобретения подобной зарубежной техники. В последние годы особое внимание уделяется возможности изготавливать детали сложной конфигурации и сварных конструкций из перспективных магниевых сплавов, содержащих РЗМ [5, 10–12].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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») [13].

Целью термической обработки изделий из магниевых сплавов являются повышение прочностных свойств и пластичности, снятие внутренних напряжений и стабилизация свойств. Рассмотрим некоторые особенности термической обработки магниевых сплавов.

Наиболее ответственной операцией термической обработки является закалка, так как при этой операции нагрев производится в области температур, близких к началу оплавления. Двух- или трехступенчатый нагрев под закалку снижает возможность оплавления и пережога изделий. При одноступенчатом нагреве рекомендуется, чтобы продолжительность нагрева изделий до температуры закалки была не менее 2–3 ч. Увеличение длительности нагрева способствует общему выравниванию механических свойств.

Особенностью поведения магниевых сплавов при нагреве является медленное протекание диффузионных процессов и, как следствие, длительные режимы нагрева при закалке и старении. Вследствие медленного протекания диффузионных процессов закалка многих марок сплавов может производиться в воздухе. Закалка в струе сжатого воздуха, и особенно в воде, значительно повышает прочностные свойства сплавов.

Основное назначение закалки магниевых сплавов – подготовка сплава к старению. Упрочнение при старении представляет собой обычное явление для ряда образующих магниевые сплавы систем.

Для деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов, не упрочняемых термической обработкой, применяют высокотемпературный (рекристаллизационный) и низкотемпературный (для снятия остаточных напряжений) отжиги. Температуру и продолжительность отжига выбирают в зависимости от природы сплава и требований, предъявляемых к уровню механических и технологических свойств сплава. Наиболее высокие температуры рекристаллизации характерны для сплавов, легированных РЗМ. Скорость охлаждения после отжига существенно не влияет на свойства большинства деформируемых магниевых сплавов [14].

Технология проведения термической обработки деформируемых магниевых сплавов, применяемая в настоящее время, использует в основном достижения прошлых лет. Тем не менее в данной области проводятся исследования и есть достижения.

В настоящее время могут быть отмечены несколько основных направлений в области термической обработки деформируемых магниевых сплавов: повышение характеристик деформируемых магниевых сплавов по схеме «теоретические предпосылки–состав сплава–технология его изготовления (в том числе применение определенных режимов термической обработки)»; подбор и оптимизация легирующих элементов сплава; использование комбинированных схем ТМО (термомеханическая обработка).

Однако преобладающей является тенденция зависимости подбора оптимального режима термической обработки от содержания легирующих элементов, преимущественно РЗМ, в сплаве. Так, автор работы [15] полагает, что основным направлением повышения прочности и жаропрочности магниевых сплавов является использование для их легирования тяжелых РЗМ (Gd, Sm и др.), а также Y и Sc. На лабораторных и опытно-промышленных образцах прочность этих сплавов после термической обработки (Т6 или Т5) может достигать 450–500 МПа. Однако в промышленных условиях реализуется прочность до 400–450 МПа при относительно невысокой пластичности (2–8%). В качестве примера приведены свойства сплава системы (здесь и далее – % (по массе)) Mg–(10–12)Gd–(2–3)Y–(Zn, Zr) – разработка Института прикладной химии Академии наук Китая. Сплав рекомендуется как материал с высоким сопротивлением ползучести до 350°C при прочности соответственно в условиях 20°C (300°C) –  $\sigma_b=500$  (270) МПа;  $\sigma_{0,2}=450$  МПа;  $\delta=3$ –6%.

Сплав WGZ1152 системы Mg–11Y–5Gd–2Zn–0,5Zr после проведения старения при температуре 225°C в течение 24 ч (состояние Т6) показывает аномальную положительную температурную зависимость прочности от комнатной температуры до 250°C и сохраняет прочность >260 МПа вплоть до 300°C. Предел прочности при растяжении при комнатной температуре сплава после старения (Т6) –  $\sigma_b=307\pm 6$  МПа, а удлинение –  $\delta=1,4\pm 0,3\%$  [16].

Компанией Societe Hispano-Suiza рассматривается способ производства деталей из магниевых сплавов системы Mg–(0,2–1,3)Zn–(2–4,5)Nd–(0,2–1,0)Zr–(0,2–0,7)РЗМ с атомной массой от 62 до 71 методом горячейковки. Объемная штамповка в закрытых и открытых штампах проводится при температуре >400°C, что повышает прочность и технологичность сплава. Способ позволяет получать корпусные детали ракетно-космических изделий, работающих при температурах до 200°C длительно и при 300°C кратковременно и не подвергающихся старению. Кратковременная прочность при 150°C составляет ~ (165–170) МПа, при 300°C –  $\sigma_b\approx 113$  МПа [17].

Исследование магниевых сплавов с РЗМ дает основание считать, что наиболее перспективными материалами для практического использования являются те, которые содержат РЗМ разных подгрупп: цериевой и иттриевой [18]. Эти сплавы характеризуются повышенными прочностными свойствами при комнатной и повышенной температурах. Изучение этих сплавов позволяет сделать два основных вывода:

– в тройных сплавах магния с РЗМ разных подгрупп прослеживается влияние каждого из РЗМ на поведение при распаде пересыщенного магниевых твердого раствора, характерного для двойных сплавов с другим РЗМ. Эффект упрочнения при распаде в тройных сплавах оказывается более высоким, чем в двойных сплавах с близким содержанием РЗМ;

– изменение характера распада магниевых твердых растворов в тройных сплавах с РЗМ разных подгрупп по сравнению с двойными сплавами может быть объяснено растворимостью РЗМ каждой из подгрупп в продуктах распада другого РЗМ [19].

Авторами статьи [20] установлено, что эффективным является одновременное применение двух и более редкоземельных элементов (РЗЭ), принадлежащих к различным подгруппам. В результате совместного легирования магниевых сплавов РЗЭ из разных подгрупп время достижения наибольшего эффекта при старении сокращается по сравнению со сплавом, легированным только одним элементом – в частности, иттрием. Оптимальной температурой старения можно считать 200°C.

В исследовании, приведенном в работе [21], на горячепрессованной плите сплава типа ИМВ7-1 (5,0–6,5% Y, 3,5–5,5% Gd, 0,15–0,7% Zr, основа – Mg) после старения (температура 200°C, продолжительность – до 128 ч) достигнуты следующие значения механических свойств при кратковременных испытаниях на растяжение в продольном направлении:  $\sigma_B=435$  МПа,  $\sigma_{0,2}=338$  МПа,  $\delta=4,9\%$  – при комнатной температуре и  $\sigma_B=165$  МПа,  $\sigma_{0,2}=141$  МПа,  $\delta=11,1\%$  – при 300°C при низкой анизотропии.

Исследовано влияние РЗЭ иттрия и неодима (в соотношении 3:2) при процентном содержании 1–4% на микроструктуру и механические свойства при повышенных температурах сплава AZ81 [22]. Результаты показали, что соответствующее содержание РЗМ заметно улучшает микроструктуру сплава, снижает количество фазы  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , образует интерметаллиды  $\text{Al}_2\text{Y}$  и  $\text{Al}_2\text{Nd}$ . После термообработки на твердый раствор (закалки), с увеличением процентного содержания РЗМ, предел прочности и относительное удлинение сплава (при комнатной температуре, 150 и 250°C) сначала увеличиваются, затем уменьшаются. Когда содержание РЗМ превышает 2%, значение предела прочности при комнатной температуре и при 150°C достигают максимума и составляют 282 и 212 МПа соответственно. При этом значение относительного удлинения при комнатной и повышенной температурах также достигает максимума 13 и 15% соответственно.

Установлено, что гомогенизация повышает запас пластичности сплава. Для сложнолегированного сплава явные преимущества имеет ступенчатая гомогенизация. Проведение двухступенчатой гомогенизации литых заготовок способствует также расширению температурного интервала деформации сплава МА5 без опасности оплавления. В результате запас пластичности сплава увеличивается приблизительно в 1,3–2 раза по сравнению с литым состоянием или состоянием после одноступенчатой гомогенизации. Анализ результатов испытания механических свойств прессованных прутков из сплава МА5 в исходном (горячепрессованном) состоянии и после термической обработки, включающей закалку (режим Т4), закалку+старение (режим Т6), а также после старения (режим Т1) подтверждает, что сплав термически упрочняется. Максимальный уровень прочности получен на прутке в состоянии Т6 [23].

Для деформируемого сплава Mg–6,5Zn–1Y рассмотрены различные режимы термообработки и получены следующие результаты: естественное старение в течение 3 лет –  $\sigma_B=263$  МПа,  $\sigma_{B,сж}=238$  МПа; после отжига при 400°C –  $\sigma_B=190$  МПа;  $\sigma_{B,сж}=186$  МПа; после отжига+старение при 200°C –  $\sigma_B=241$  МПа;  $\sigma_{B,сж}=220$  МПа [23].

Для экспериментальных сплавов, имеющих составы Mg–3Y и AZ31+1Y, проводился гомогенизационный отжиг при 380°C в течение 12 ч, затем дальнейший отжиг при температуре 400°C в течение 10 мин. В результате размер зерна литой заготовки снизился до 103–115 мкм [24].

В статье [25] рассмотрено влияние режимов гомогенизации слитков  $\varnothing 650$  мм из сплавов MA14, MA19 и MA20 на структуру и механические свойства. Исследованы различные режимы гомогенизационного отжига – 1 режим: 350°C, 12 ч; 2 режим: 390°C, 12 ч; 3 режим: 410°C, 12 ч. В зависимости от требований к уровню механических свойств может быть рекомендован один из указанных режимов.

Исследователями из Национального Института металловедения (National Institute for Metals Science – Япония) [26] рассматривается возможность улучшения свойств недорогих магниевых сплавов системы Mg–Sn–Zn–Al (например, сплава марки TZA542) за счет оптимизации режимов термообработки (закалка+старение). При этом установлено, что достижение хорошего сочетания свойств при сжатии и растяжении прессованных прутков после выбранных режимов термической обработки объясняется особенностями морфологии и топологии упрочняющих частиц интерметаллидной фазы Mg<sub>2</sub>Sn.

Упрочнение при старении представляет собой обычное явление для ряда образующих сплавы систем, включая сплавы на основе магния. Многие литейные и деформируемые сплавы магния способны к упрочнению при старении. Наиболее распространенными за рубежом являются сплавы на основе систем Mg–Zn(–Zr) (серия ZK), Mg–Zn–Cu (серия ZC), Mg–Zn–RE (серии ZE и EZ, где RE – означает редкоземельные элементы), Mg–Zn–Mn(–Al) (серия ZM), Mg–Al–Zn(–Mn) (серии AZ и AM), Mg–Y–RE(–Zr) (серия WE), Mg–Ag–RE(–Zr) (серии QE и EQ), Mg–Sn(–Zn, Al, Si), в России это сплавы систем Mg–Zn–Zr, Mg–PЗМ–Mn и Mg–А–Zn. Упрочнение при старении происходит в основном в результате образования мелкодисперсных выделений, которые упрочняют магниевую основу и формируют препятствия для скольжения дислокации, увеличивая таким образом способность сплава противостоять деформации, приводящей к разрушению. В общем случае оптимальное упрочнение достигается при наличии высокой плотности однородно распределенных и очень близко расположенных дисперсных выделений, через которые затруднено прохождение скользящих дислокаций.

Несмотря на то что в основном сплавы на основе магния подвергают термообработке при повышенной температуре (обычно T<sub>6</sub>), в работе [27] предложен способ низкотемпературного старения.

По мнению автора работы [27], низкотемпературная термообработка применима к любым дисперсионно-твердеющим сплавам на основе магния – как к литейным, так и к деформируемым. Данный вид термической обработки высокоэффективен для сплавов, содержащих ускорители старения, т. е. элементы, способствующие зародышеобразованию дисперсных выделений и увеличивающие скорость зародышеобразования. Например, в сплавах магния, содержащих в качестве основного легирующего элемента цинк, такими ускорителями могут являться марганец и алюминий. В результате введения помимо ускорителей других легирующих добавок низкотемпературная термообработка может быть ускорена, что приводит к обеспечению улучшенных механических свойств, таких как пластичность, уровни прочности и твердости, сравнимых или превосходящих таковые, достигнутые в условиях термообработки по режиму T<sub>6</sub>. Вязкость разрушения сплавов также может быть значительно повышена с использованием способа, представленного в патенте на изобретение. Низкотемпературную термообработку сплава проводят после гомогенизационного отжига и закалки (сплав следует не просто охладить, а быстро закалить в соответствующей закалочной жидкости). После закалки сплав обычно сразу помещают в температурные условия старения

или оставляют при температуре окружающей среды в случае термообработки при комнатной температуре. Низкотемпературное старение обычно проводят при температуре окружающей среды и  $110 \pm 10^\circ\text{C}$ .

В работе [28] авторами предложен способ термической обработки сплава системы Mg–Zn–Zr, который при минимальном расходе тепловой и электрической энергии обеспечил бы сохранение всех положительных характеристик материала деталей (в данном случае – мотоциклетных дисков). На Красноярском металлургическом заводе (ООО «КраМЗ») при подготовке указанных заготовок применяют длительную термическую гомогенизацию. Между тем расход тепловой энергии можно уменьшить, если применять термоциклическую обработку (ТЦО), которая оказывает благотворное влияние на ускоренные структурные изменения в сплаве и сокращает длительность гомогенизации. Отличие термоциклической обработки от термической заключается в использовании многократных нагревов и охлаждений с оптимальными скоростями и отсутствием выдержки при максимальных температурах нагрева.

Одним из направлений в исследованиях термической обработки деформируемых магниевых сплавов является применение различных режимов рекристаллизационных отжигов.

Автор работы [29] видит в качестве одного из основных путей создания деформируемых магниевых сплавов и полуфабрикатов из них с повышенной пластичностью (деформируемостью) применение различных режимов рекристаллизационных отжигов (в основном после тепловой и холодной прокатки) для регламентирования зеренной структуры, степени рекристаллизации и кристаллографической текстуры магниевых сплавов (состояния M, H2 и т. п.).

Установлено [30], что в деформируемых магниевых сплавах с РЗМ возможно получение стабильных прочностных и пластических свойств путем применения низкотемпературного рекристаллизационного отжига. Комплексное легирование РЗМ и применение рекристаллизационного отжига позволяет получать оптимальное сочетание свойств в деформированных полуфабрикатах.

### Заключения

Таким образом, исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что термическая обработка является немаловажной составляющей технологического процесса изготовления изделия. Создаются основы новых технологий изготовления магниевых сплавов, при этом широко используется механизм воздействия деформации и термической обработки на структуру, фазовый состав, а также на прочностные свойства сплавов. Преобладающей тенденцией развития в области термической обработки магниевых сплавов является зависимость подбора оптимального режима термической обработки от содержания легирующих элементов, преимущественно РЗМ, в сплаве.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.К. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2013-0-S2-3-10.
3. 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.

4. Волкова Е.Ф. Анализ и итоги Международной конференции «Магний–21. Новые горизонты» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-86-94.
5. Каблов Е.Н. *Материалы и химические технологии для авиационной техники* // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
6. Волкова Е.Ф., Антипов В.В. *Магниево деформируемые сплавы* // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №5. С. 20–26.
7. Волкова Е.Ф. *Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния* // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. №11. С. 5–9.
8. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение: итоги и перспективы* // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
9. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. *Динамика развития магневых и литейных алюминиевых сплавов* // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №5. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
10. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. *Особенности свариваемости нового деформируемого магниевого сплава ВМД16* // *Сварочное производство*. 2017. №6. С. 3–11.
11. Woo W., Feng Z., Wang X.-L., David S.A. *Neutron diffraction measurements of residual stresses in friction stir welding: a review* // *Sci. Tech. Welding and Joining*. 2011. Vol. 16 (1). P. 23–32.
12. Woo W., Choo H., Prime M.B. et al. *Microstructure, texture, and residual stress in a friction stir processed AZ31B Mg alloy* // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56 (8). P. 1701–1711.
13. 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.
14. Антонов Е.Г., Арбузов Б.А., Бабкин В.М. и др. *Магниево сплавы: справочник*. М.: *Металлургия*, 1978. Ч. 2: *Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов*. С. 208–216.
15. Елкин Ф.М. *Деформируемые магниево сплавы: современное состояние и перспективы* // *Технология легких сплавов*. 2009. №3. С. 9–20.
16. Yin D.D., Wang Q.D., Gao Y. et al. *Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of Mg–11Y–5Gd–2Zn–0,5Zr (wt. %) alloy* // *Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. No. 5. P. 1696–1704.
17. *Process for manufacturing hot-forged parts made of a magnesium alloy: pat. FR2904005 (A1); field: 25.01. 08; publ. 25.03.08.*
18. Мостяев И.В. *РЗЭ – фактор качественного повышения свойств магневых сплавов (обзор)* // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №7. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-2-2.
19. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарыгина И.Е. *Исследование магневых сплавов с двумя редкоземельными металлами разных подгрупп, цериевой и иттриевой* // *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 70 лет: сб. науч. тр. М.: Интерконтакт Наука, 2008. С. 304–315.*
20. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Бецофен С.Я., Акинина М.В. *Исследование влияния РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп на свойства магневых сплавов* // *Технология легких сплавов*. 2014. №2. С. 42–48.
21. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарыгина И.Е., Лукьянова Е.А. *Поведение при отжиге высокопрочного магниевого сплава ИМВ7-1 системы Mg–Y–Gd–Zr* // *Перспективные материалы*. 2011. №6. С. 53–58.
22. Jian-Chang Xie, Quan-An Li, Xiao-Qiang Wang, Jian-Hong Li. *Microstructure and mechanical properties of AZ81 magnesium alloy with Y and Nd elements* // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008. Vol. 18. Issue 2. P. 303–308.

23. Волкова Е.Ф., Синябрюхов С.Л., Гнеденков С.В., Бецоффен С.Я. Влияние деформации и термической обработки на структуру и свойства магниевого сплава МА5 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. №10. С. 55–59.
24. Pekguleryuz M.O. Magnesium alloy development for high-temperature automotive applications // *Proceedings of the Second Russian International Conference «Magnesium – Broad Horizons»*. СПб., 2007 (CD).
25. Овсянников Б.В., Замятин В.М. Влияние технологических факторов на структуру и механические свойства слитков и полуфабрикатов из магниевых сплавов // *Proceedings of the Second Russian International Conference «Magnesium – Broad Horizons»* СПб., 2007 (CD).
26. Sasaki T.T., Ohkubo T., Hono K. Age Hardening Behavior of Mg–1.2Sn–1.7Zn Alloy Containing Al // *Magnesium Technology. P. V: Alloy and Microstructural Design*. 2012. P. 179–185.
27. Способ температурной обработки сплавов магния: пат. 2454479 Рос. Федерация; заявл. 20.06.11; опубл. 27.06.12.
28. Меркулова Г.А., Богданова Т.А., Мартынова Я.А. Поиск энергосберегающей технологии при подготовке заготовок для штамповки деталей из магниевого сплава системы магний-цинк-цирконий // *Материалы конф. «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения»*. 2010. С. 114–116.
29. Елкин Ф.М. Основные пути повышения пластичности деформируемых Mg-сплавов // *Proceedings of the First Russian International Conference and Exhibition of «Magnesium – Broad Horizons»*, November 29– December 12, 2005 (CD).
30. Волкова Е.Ф. Анализ состояния и перспективы развития деформируемых магниевых сплавов // *Proceedings of the First Russian International Conference and Exhibition of «Magnesium – Broad Horizons»*, November 29 – December 12, 2005 (CD).