

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии  
и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН**

**80 лет**

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

**УДК 669.1; 546.1; 546.3**

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.  
Сборник научных трудов.  
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

*Редакционная коллегия*

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

## Перспективы разработки новых конструкционных магниевого сплавов, содержащих редкоземельные металлы

*Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, Е.А. Лукьянова, И.Е. Тарытина*

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-171-186

### Введение

Начиная с конца 20-го столетия, магний и магниевым сплавам уделяется повышенное внимание. Это проявляется, в частности, в большом числе исследований, а также публикаций и международных конференций по магниевым сплавам и их применению, которые проводятся в различных странах.

В середине 80-х годов мировое производство магния устанавливается на постоянном уровне 230-260 тыс. т в год [1]. Однако, начиная с середины 90-х годов, оно резко возрастает и в 2000 г оценивается в 443,5 тыс. т в год [2], то есть становится больше приблизительно в 1,8 раза. Естественно, что такое значительное увеличение производства первичного магния не могло быть осуществлено за счет внутренних резервов предприятий – производителей. Для его осуществления в 90-е годы были построены дополнительно заводы по производству первичного магния в Канаде, Израиле, Китае и других странах. Особенно значительно увеличилось производство магния в Китае, который в настоящее время стал ведущим производителем первичного магния [2]. В 21-м веке производство первичного магния продолжает расширяться с оценкой в 833 тыс. т в 2012 году и 897 тыс. т в 2013 году с ростом на 7,7% в годовом исчислении [3]. Согласно прогнозу Международной Магниевого Ассоциации (International Magnesium Association), мировое производство магния в 2016 году составило около 1 млн. тонн [4].

Магний имеет различное применение в промышленности. Он используется как легирующая добавка в алюминиевых сплавах, как восстановитель при производстве других металлов, например, титана, для получения высокопрочных чугунов, десульфурации стали, но существенная часть его используется для производства специальных сплавов, которые применяются в основном как легкие конструкционные материалы [1, 2]. Именно эта область применения магния в наибольшей степени расширилась в

последние годы, и с ее расширением связан значительный рост общего производства этого металла.

Основным достоинством магниевых сплавов как конструкционных материалов является их малый удельный вес, обусловленный малым удельным весом чистого магния ( $1,74 \text{ г/см}^3$ ). Более тяжелые легирующие элементы, вводимые обычно в магниевые сплавы для улучшения их свойств, повышают удельный вес незначительно (не более 7%). Тем самым применение магниевых сплавов обеспечивает снижение собственного веса изделий, в которых они используются, обеспечивая улучшение их технических и эксплуатационных характеристик. Снижение собственного веса изделий является важным в различных областях техники, но особенно важным оно оказывается для изделий авиационной и космической техники и других летательных аппаратов, для применения в которых магниевые сплавы разрабатывались и начали использоваться в первую очередь. Снижение собственного веса летательных аппаратов способствует повышению их грузоподъемности, увеличению скорости и дальности полета, уменьшению расхода топлива. Однако по тем же причинам снижение собственного веса является важным и для наземного транспорта: легковых и грузовых автомашин, железнодорожных вагонов и локомотивов. Желательно также, чтобы как можно более низким собственным весом обладали и корпуса оптических и электронных приборов, ряда изделий хозяйственного назначения таких, как стремянки, разного рода тележки, чемоданы и т.д. [5].

Таким образом, спрос на магниевые сплавы достаточно большой и его можно было бы удовлетворить, учитывая большие сырьевые ресурсы для производства магния и их доступность: карналлита  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , доломита  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , магнезита  $\text{MgCO}_3$  и других, а также морской воды и воды соленых озер. Тем не менее, до 90-х годов 20-го столетия общее производство магния изменялось незначительно и, соответственно, незначительно изменялось его применение в виде сплавов [1, 3, 6]. Основной причиной этого являлось то, что у магниевых сплавов как легких конструкционных материалов имелся и остается серьезный конкурент – алюминиевые сплавы. Удельный вес алюминиевых сплавов больше, чем удельный вес магниевых сплавов. Он близок к удельному весу алюминия ( $2,70 \text{ г/см}^3$ ). При этом на алюминиевых сплавах достигаются более высокие прочностные свойства с более высокими значениями модулей упругости, так что, в общем, оказываются несколько более высокими значения удельной прочности (отношение предела прочности к удельному весу) и удельной жесткости (отношение модуля упругости к удельному весу). Однако

сравнение магниевых и алюминиевых сплавов по этим удельным характеристикам при прогнозе возможного снижения собственного веса изготовленных из них конструкций не является достаточно точным. При более точных оценках следует учитывать, кроме того, абсолютные значения удельного веса материалов. В этом случае при равной прочности стенок и ребер конструкции из более легких магниевых сплавов они оказываются более толстыми, а так как жесткость элементов конструкции увеличивается пропорционально третьей степени толщины, то эти элементы и конструкции в целом из более легких магниевых сплавов оказываются более легкими. Поэтому при использовании магниевых сплавов вместо алюминиевых можно все-таки добиться ощутимого снижения собственного веса конструкций при несколько более низких значениях удельной прочности и жесткости магниевых сплавов [7].

В ряде областей, а это, в первую очередь, в авиационной технике и космических аппаратах снижение собственного веса конструкций является настолько важным, что оправдывает применение легких магниевых сплавов, несмотря на то, что некоторые из них могут содержать дорогие легирующие элементы. В соответствии с развитием автомобильной промышленности и повышением требований к снижению собственного веса автомобилей, была установлена также экономическая целесообразность применения в них магниевых сплавов. Таким образом, магниевые сплавы стали применяться в значительном объеме в автомобилях, несмотря на менее строгие требования в них к снижению собственного веса, чем в летательных аппаратах [8, 9]. Так, например, в одном из крупнейших производителей автомобилей – фирме Дженерал Моторс, США, использование магниевых сплавов увеличилось с 9500 тонн в 1997 г. до 23000 тонн в 2002 г. [10]. Увеличение общего производства первичного магния расширило возможности применения конструкционных магниевых сплавов и для других целей, где снижение собственного веса конструкций важно, но в меньшей степени, чем в летательных аппаратах.

Основными характеристиками магниевых сплавов, предназначенных для использования в качестве конструкционных материалов, являются их прочностные свойства. Повышение прочностных свойств магния достигается в основном путем легирования. Однако, число металлов, которые используются для этих целей, весьма ограничено. Это алюминий, цинк, кремний, литий, марганец, цирконий. В некоторых магниевых сплавах, предназначенных для использования в качестве конструкционных материалов, предложено вводить также в небольших количествах серебро,

медь, никель, кальций, олово, торий. Предложены и нашли применение сплавы, содержащие в качестве возможных легирующих элементов редкоземельные металлы, но только некоторые из них.

Возможности использования для легирования магния тех или иных металлов определяются физико-химическим взаимодействием их с магнием (в первую очередь, растворимостью в расплавленном магнии для того, чтобы можно было создать сплав) и образованием твердых растворов на основе магния (что наиболее эффективно обеспечивает повышение прочностных свойств), а также стоимостью металла, используемого для легирования. Наиболее широкое практическое применение в качестве конструкционных материалов нашли магниевые сплавы систем Mg-Al-Zn-Mn и Mg-Zn-Zr [11]. Прочностные свойства сплавов этих систем, однако, существенно снижаются при повышении температуры выше комнатной, начиная со 100-150°C, что делает нецелесообразным применение их в ряде областей в том числе в авиационной и космической технике. Более жаропрочными оказались сплавы, содержащие редкоземельные металлы, которые могут быть использованы до температур 250-300°C [12].

### **Редкоземельные металлы как легирующие добавки к магнию**

Редкоземельные металлы включают в себя близкие по химическим свойствам 17 элементов, располагающихся в Шв подгруппе Периодической системы элементов. Из них 15 элементов с атомными номерами 57-71 от лантана до лютеция носят название ряд лантана и располагаются в одной ячейке Периодической системы элементов в 6-м периоде. Остальные два элемента, скандий и иттрий, располагаются в 4-м и 5-м периодах, соответственно. Кроме того, среди редкоземельных металлов выделяют две подгруппы: цериевую подгруппу, включающую первую половину элементов ряда лантана от лантана до европия, и иттриевую подгруппу, включающую вторую половину ряда лантана от гадолиния до лютеция и иттрий [13].

Интерес к использованию редкоземельных металлов в качестве легирующих добавок в конструкционных магниевых сплавах существенно возрос в конце 40-х годов прошлого столетия в связи с необходимостью использования в авиационной технике легких конструкционных материалов с достаточно хорошими прочностными свойствами при повышенных температурах. К тому времени в качестве легирующей добавки к магнию был известен только мишметалл, представляющий собой смесь редкоземельных металлов, состоящей в основном из церия и поэтому неточно называемого церием. Именно сплавы магния, содержащие мишметалл, показывали

наиболее высокие прочностные свойства при температурах до 200°C [14]. В дальнейшем было установлено, что четыре основных составляющих мишметалла: лантан, церий, празеодим и неодим, оказывают различное влияние на жаропрочность магния. Из них в наибольшей степени способствует повышению прочностных свойств при повышенных температурах неодим, имеющий наибольший атомный номер, а имеющий наименьший атомный номер лантан повышает прочностные свойства магния при повышенных температурах незначительно [14, 15]. Дальнейшие исследования показали, что редкоземельные металлы как легирующие добавки могут существенно различаться между собой по влиянию на прочностные свойства магния. При этом прослеживаются определенные закономерности в их влиянии на магний и в наибольшей степени различаются по влиянию на магний редкоземельные металлы разных подгрупп, цериевой и иттриевой.

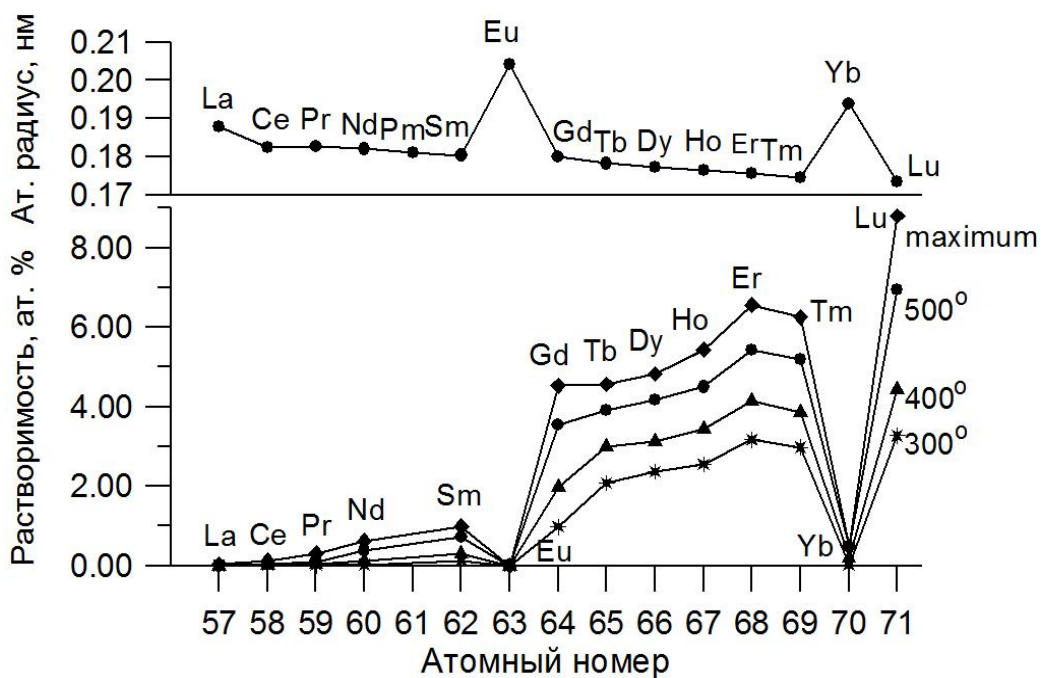


Рис.1. Изменение атомного радиуса редкоземельных металлов ряда лантана и их растворимости в твердом магнии с увеличением атомного номера [12].

Различное влияние отдельных редкоземельных металлов на прочностные свойства магния, в первую очередь, обусловлено различной протяженностью магниевых твердых растворов, которые могут образовываться в сплавах магния с различными редкоземельными металлами.

Протяженность магниевых твердых растворов, содержащих редкоземельные металлы, уменьшается с понижением температуры в широких диапазонах значений максимальной растворимости каждого из редкоземельных металлов в твердом магнии и значений растворимости в магнии при определенных температурах. При этом четко прослеживается связь между растворимостью редкоземельных металлов в твердом магнии и атомным номером редкоземельных металлов. С увеличением атомного номера в пределах ряда лантана, атомные радиусы элементов уменьшаются. При этом, чем меньше атомный радиус редкоземельного металла, а, следовательно, разница между атомными радиусами редкоземельного металла и магния, тем растворимость редкоземельного металла в твердом магнии больше. Указанная закономерность для элементов ряда лантана показана на рис.1 [12] и распространяется также на два других редкоземельных металла, иттрий и скандий, имеющих атомные радиусы 0,18012 и 0,16406 нм с максимальными растворимостями в твердом магнии 3,6 и 15 ат. %, соответственно. В общем, она согласуется с известными правилами образования твердых растворов между металлами. Атомный радиус магния составляет 0,1602 нм [16].

Второй причиной различного влияния отдельных редкоземельных металлов на механические свойства магния является различное влияние их на кинетику и масштаб упрочнения сплавов при распаде образующегося пересыщенного магниевого твердого раствора. Этот процесс происходит при старении сплавов и в основном определяет уровень достигаемых в них прочностных свойств. На рис.2 приведены результаты измерения твердости при изотермическом старении двойных сплавов магния с различными редкоземельными металлами, в которых наблюдается существенное упрочнение при распаде пересыщенного магниевого твердого раствора. Измерения были проведены в ИМЕТ РАН на сплавах, полученных путем плавки в тиглях из малоуглеродистой стали с использованием покровного флюса ВИ-2, состоящего из смеси хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов. Флюс предохранял расплавы от загорания. В качестве шихтовых материалов использовали магний чистотой 99,96% и лигатуры, приготовленные с использованием того же магния и редкоземельных металлов чистотой 99,83%. Отливка сплавов проводилась в изложницу из нержавеющей стали, нагретой до  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ . Полученные слитки сплавов диаметром 15 мм подвергались гомогенизации с нагревами при температурах, близких к температурам максимальной растворимости редкоземельных металлов в твердом магнии, с последующей закалкой в воде при комнатной температуре. Изготовленные из слитков образцы всех сплавов



подвергались старению одновременно при одной температуре 200°C, которая была выбрана как температура, при которой обычно достигается наибольшее упрочнение в таких сплавах при разумных продолжительностях выдержки.

Из представленных на рис.2 данных можно видеть, что характер кинетики упрочнения при старении сплавов магния с редкоземельными металлами разных подгрупп различный, но одинаковый для сплавов с редкоземельными металлами одной подгруппы. В случае сплавов с редкоземельными металлами цериевой подгруппы (Nd и Sm) наблюдается одна стадия упрочнения с существенным упрочнением уже при первых небольших выдержках при старении, и максимум упрочнения достигается при небольших выдержках. В случае же сплавов с редкоземельными металлами иттриевой подгруппы (Gd, Tb, Dy, Ho и Y) прослеживаются две стадии упрочнения при старении. На первой стадии имеет место незначительное упрочнение, затем на второй стадии твердость резко возрастает, и достигается максимум, который значительно выше, чем у сплавов с редкоземельными металлами цериевой подгруппы. Однако, время старения, при котором достигается максимум твердости в сплавах с элементами иттриевой подгруппы, значительно больше, чем в сплавах с элементами цериевой подгруппы.

Следует также отметить, что имеются различия между сплавами с различными редкоземельными металлами и в пределах каждой из двух подгрупп. В случае цериевой подгруппы скорость распада магниевое твердого раствора и максимум упрочнения с увеличением атомного номера редкоземельного элемента (от неодима к самарию) последовательно увеличиваются. Это соответствует более высокой растворимости самария в твердом магнии, если ее сравнивать с растворимостью в твердом магнии неодима. В случае сплавов магния с элементами иттриевой подгруппы ряда лантана достаточно четко проявляется последовательно только уменьшение скорости распада пересыщенного магниевое твердого раствора с увеличением атомного номера элементов: Gd, Tb, Dy и Ho. Это можно проследить по смещению в сторону увеличения продолжительности старения участков соответствующих кривых изменения твердости на кривых на рис.2, соответствующих резкому возрастанию твердости на второй стадии упрочнения. При сравнении сплавов магния с элементами иттриевой подгруппы ряда лантана по величине максимума твердости наибольшее ее значение наблюдается в сплаве магния с первым из этих элементов, гадолинием. В сплавах с тербием и диспрозием, двумя другими элементами ряда лантана, следующими за гадолинием, достигаемый максимум твердости

снижается. Однако в сплаве с металлом, имеющим следующий атомный номер, гольмием, величина максимума твердости увеличивается и приближается к той, которая наблюдается в сплаве с гадолинием.

Кинетика изменения твердости с увеличением времени старения в сплаве магния с иттрием такая же, как и у других рассматриваемых сплавов магния с редкоземельными металлами иттриевой подгруппы. В ней отчетливо проявляются две стадии распада магниевых твердых растворов. Однако, твердость сплава с иттрием, в том числе и максимальная твердость, оказалась более низкой, чем в сплавах с остальными элементами иттриевой подгруппы, что можно объяснить меньшей концентрацией магниевых твердых растворов в сплаве с иттрием. Скорость распада пересыщенного магниевых твердых растворов в сплаве магния с иттрием оказалась промежуточной между скоростями распада в сплавах магния с диспрозием и гольмием.

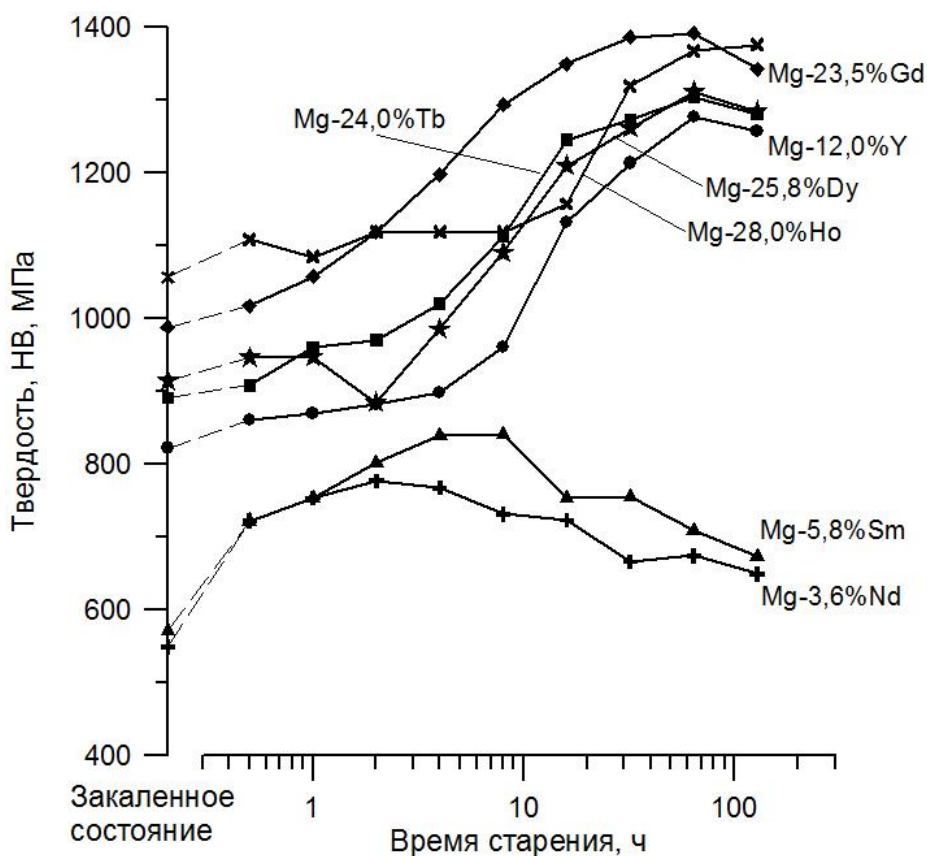


Рис.2. Изменение твердости двойных сплавов магния с различными редкоземельными металлами с увеличением времени старения при температуре 200°C.

По влиянию на магний в двойных системах редкоземельные металлы каждой из подгрупп имеют достоинства и недостатки. Достоинством редкоземельных металлов цериевой подгруппы является более высокая скорость распада пересыщенного магниевых твердого раствора, сопровождающегося упрочнением, и соответственно меньшим временем старения для достижения максимума твердости. Достоинством же редкоземельных металлов иттриевой подгруппы является более высокий эффект упрочнения при распаде магниевых твердого раствора и более высокая твердость на максимуме, но для этого требуется значительно более длительная выдержка при старении. Таким же образом можно сравнивать между собой редкоземельные металлы, принадлежащие к одной подгруппе. Учитывая это, можно считать, что при разработке новых конструктивных магниевых сплавов с лучшими характеристиками следует использовать не один какой-либо редкоземельный металл, а два или более с тем, чтобы по мере возможности могли использоваться достоинства каждого металла. При этом следует принимать во внимание, что редкоземельные металлы, в общем, являются дорогими материалами и различаются между собой по цене в широком диапазоне.

Возможности влияния на свойства магния совместно двух редкоземельных металлов определяются соответствующими тройными диаграммами состояния в областях, примыкающих к магниевому твердому раствору. Часть из них уже изучена. Это диаграммы состояния систем Mg-La-Ce, Mg-Nd-Pr, Mg-Gd-Y, Mg-Sm-Y, Mg-Sm-Gd [14], Mg-Sm-Tb [17], Mg-Dy-Sm [18] и некоторые другие. Обобщение результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод, что эти тройные диаграммы состояния имеют общие черты, которые состоят в том, что в равновесии с магниевым твердым раствором в них находятся только две фазы, являющиеся ближайшими к магнию соединениями в прилегающих к магнию двойных системах. При этом в каждом из двойных соединений магния с редкоземельным металлом растворяется в значительном количестве другой редкоземельный металл. Поэтому в тройных сплавах магния с двумя редкоземельными металлами могут в той или иной степени проявляться черты, характерные для сплавов каждой из соответствующих двойных систем. То же самое можно ожидать и в случае сплавов, содержащих более чем два редкоземельных металла.

**Новые исследования сплавов магния с несколькими редкоземельными металлами**

Проведенные в ИМЕТ РАН в последние годы экспериментальные исследования подтвердили указанную выше особенность сплавов магния с несколькими редкоземельными металлами и целесообразность использования для легирования магния совместно нескольких редкоземельных металлов с целью получения легких конструкционных материалов с лучшими свойствами. Одним из таких сплавов является разработанный ранее в ИМЕТ РАН совместно с ВИАМ и ВИЛС магниевый сплав ИМВ7-1, отличающийся высокой прочностью при близких к комнатной и повышенных температурах [19, 20]. Сплав содержит ~5%Y, ~5%Gd и ~0,5%Zr. Цирконий введен в сплав для измельчения величины зерна магниевое твердого раствора в литом состоянии и в процессах упрочнения при распаде магниевое твердого раствора участия не принимает. На горячепрессованной плите этого сплава в состаренном состоянии (200°C, 64 ч) имели  $\sigma_B$  435 МПа,  $\sigma_{0,2}$  338 МПа,  $\delta$  4,9% при комнатной температуре и  $\sigma_B$  336 МПа,  $\sigma_{0,2}$  286 МПа,  $\delta$  14,2% при 250°C. Литой сплав ИМВ7-1, подвергнутый старению, также показывал высокую прочность,  $\sigma_B$  ~250 МПа [21]. Несколько позже Английской компанией Magnesium Electron Ltd был предложен для промышленного использования сплав Electron 675 системы Mg-Y-Gd-Zr [22].

Иттрий значительно дешевле, чем гадолиний, и вводился в сплавы ИМВ7-1 и Electron 675 главным образом для частичной замены гадолиния, чтобы снизить стоимость сплавов. При этом характер кинетики упрочнения в процессе старения с двумя стадиями, свойственный двойным сплавам магния с редкоземельными металлами иттриевой подгруппы, сохранялся. Для достижения существенного упрочнения путем старения требовались длительные выдержки (в случае сплава ИМВ7-1 около 60 ч). В промышленных сплавах системы Mg-Y-Gd-Zr могут присутствовать в качестве примесей другие редкоземельные металлы, так как редкоземельные металлы присутствуют в рудах совместно и разделение их требует дополнительной переработки руд, причем для более полного разделения требуется более длительная и затратная переработка. В связи с этим возникла необходимость оценить, как сказывается на сплавах системы Mg-Y-Gd-Zr, предназначенных для практического использования, присутствие других редкоземельных металлов. В первую очередь следовало оценить, какое влияние на кинетику их упрочнения при старении может оказать присутствие в сплавах Mg-Y-Gd-Zr других редкоземельных металлов, кроме иттрия и гадолиния, и возможно ли за счет присутствия какого-нибудь третьего редкоземельного металла сократить время их упрочняющего старения.

Исследования в этом направлении проводились в ИМЕТ РАН в последние годы [23,24] и продолжаются в настоящее время.

В настоящей статье приводятся основные результаты этих исследований. Они проводились на сплавах, технология выплавки которых была описана выше при рассмотрении упрочнения при старении двойных сплавов. После гомогенизации полученных слитков сплавов при температуре 515°C, обеспечивающей равновесное состояние структуры и обогащенный редкоземельными металлами магниевый твердый раствор, проходила их закалка путем охлаждения в воде или на воздухе, после чего твердый раствор оказывался пересыщенным. Затем слитки разрезались на образцы, которые старились при 200°C. Результаты проведенных измерений твердости приведены на рис.3-5. Они показывают изменение твердости с увеличением времени старения сплавов в случае дополнительного легирования сплава системы Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 тремя редкоземельными металлами, самарием, диспрозием или гольмием, в двойных сплавах которых с магнием распад магниевое твердого раствора происходит с различной скоростью.

В случае добавок самария к сплавам Mg-Y-Gd-Zr распад пересыщенного магниевое твердого раствора ускоряется, на что указывает положение в сплавах с самарием участков кривых, показывающих резкое возрастание твердости при распаде, в пределах меньших значений времени старения (рис.3). Это соответствует большей скорости распада пересыщенного магниевое твердого раствора в двойных сплавах Mg-Sm, по сравнению с двойными сплавами Mg-Y и Mg-Gd. (рис.2). При этом характерный для сплавов магния с иттрием и гадолинием двухстадийный распад магниевое твердого раствора при добавках самария сохраняется.

В случае добавок к сплаву Mg-Y-Gd-Zr диспрозия изменение скорости распада магниевое твердого раствора в процессе старения проявляется в меньшей степени, но все-таки несколько снижается, как это можно видеть при сравнении положения кривых изменения твердости со временем старения сплава Mg-5%Y-5%Gd-0,5%Zr и сплава Mg-5%Y-5%Gd-5%Dy-0,5%Zr на рис.4. Это также соответствует близкой, но несколько меньшей скорости распада магниевое твердого раствора в двойных сплавах Mg-Dy по сравнению со сплавами Mg-Y и Mg-Gd (рис.2).

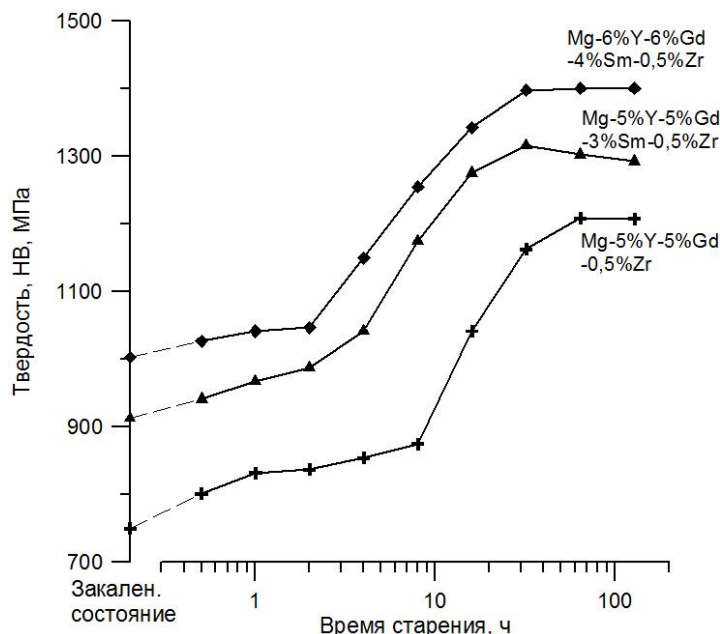


Рис.3. Изменение твердости сплавов Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 без и с добавкой самария с увеличением времени старения при температуре 200°C [23].

Представленные на рис.5 результаты измерения твердости в процессе старения сплава Mg-Y-Gd-Zr без и с добавками гольмия показывают, что в соответствии со значительно меньшей скоростью распада магниевого твердого раствора в двойных сплавах Mg-Но, по сравнению со сплавами Mg-Y и Mg-Gd, скорость распада магниевого твердого раствора с упрочнением в сплавах Mg-Y-Gd-Zr при введении в них гольмия последовательно уменьшается с увеличением содержания гольмия, так что при 4% Но упрочнения, свидетельствующего о распаде магниевого твердого раствора с выдержкой вплоть до 256 ч при температуре старения 200°C, практически не происходит.

В таблице 1 приведены результаты определения механических свойств приготовленных в одинаковых условиях литых сплавов Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 без и с добавками двух других редкоземельных металлов, самария и диспрозия, в гомогенизированном после литья и дополнительно состаренном состояниях. Можно видеть, что при определенных сочетаниях трех редкоземельных металлов в сплавах можно повысить прочностные свойства, характерные для сплавов типа ИМВ7-1, содержащих из редкоземельных металлов только иттрий и гадолиний.

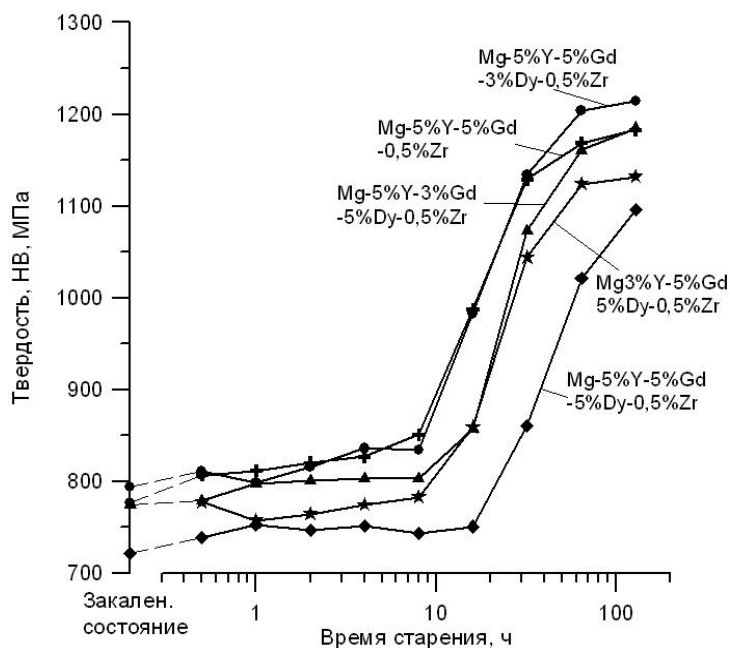


Рис.4. Изменение твердости сплавов Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 без и с добавкой диспрозия с увеличением времени старения при температуре 200°C.

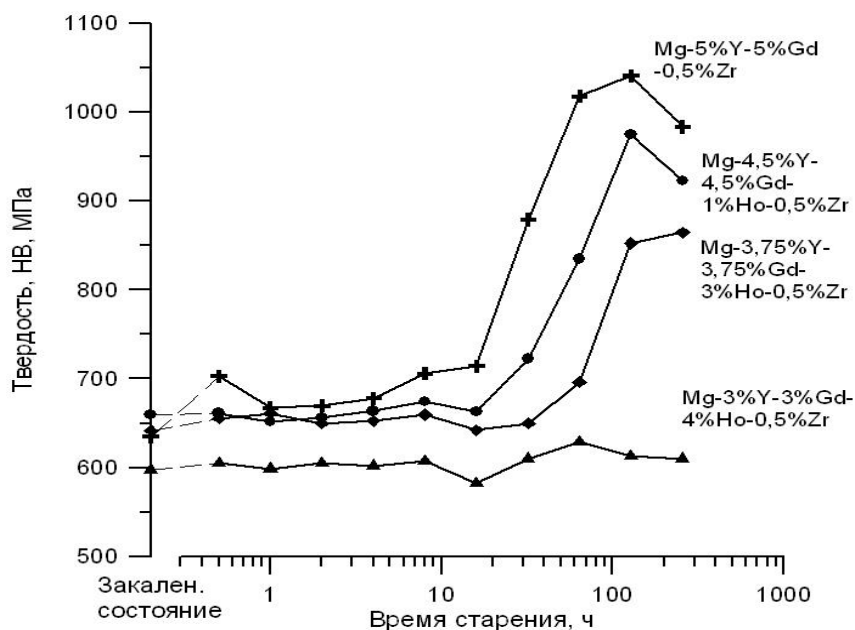


Рис.5. Изменение твердости сплавов Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 без и с добавкой гольмия с увеличением времени старения при температуре 200°C.

Механические свойства сплавов Mg-Y-Gd-Zr без и с добавками самария или диспрозия при комнатной температуре в гомогенизированном и состаренном после гомогенизации состояниях [23, 24]

| Состав сплава, масс.%               | Состояние                                | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
|-------------------------------------|--|------------------|----------------------|--------------|
| Mg-5% Y -5% Gd -0,5% Zr<br>(ИМВ7-1) | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 247              | 123                  | 10,2         |
|                                     |  | или<br>225       | или<br>158           | или<br>9,1   |
| Mg-5% Y -5% Gd -0,5% Zr<br>(ИМВ7-1) | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 250              | 186                  | 4,9          |
| Mg-7% Y -7% Gd-5% Sm-0,5% Zr        | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 260              | 176                  | 3,9          |
| Mg-7% Y -7% Gd-5% Sm-0,5% Zr        | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 299              | 267                  | 1,5          |
| Mg-4% Y -4% Gd-2% Sm-0,5% Zr        | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 245              | 170                  | 13,8         |
| Mg-4% Y -4% Gd-2% Sm-0,5% Zr        | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 284              | 261                  | 1,7          |
| Mg-5% Y -5% Gd -3% Dy-0,5% Zr       | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 226              | 186                  | 2,6          |
| Mg-5% Y -5% Gd -3% Dy-0,5% Zr       | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 318              | 227                  | 0,7          |
| Mg-5% Y-5% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 245              | 190                  | 2,6          |
| Mg-5% Y-5% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 318              | 249                  | 0,3          |
| Mg-5% Y-3% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 235              | 187                  | 3,1          |
| Mg-5% Y-3% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 303              | 211                  | 2,4          |
| Mg-3% Y-5% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Гомогенизация, 515°C, 6 ч                | 253              | 179                  | 12,5         |
| Mg-3% Y-5% Gd-5% Dy-0,5% Zr         | Старение 200°C, 24 ч после гомогенизации | 319              | 207                  | 4,0          |

### Заключение

Таким образом, присутствие различных редкоземельных металлов в качестве дополнительных легирующих добавок, а также примесей в сплавах Mg-Y-Gd-Zr может оказывать различное влияние на кинетику распада в них магниевом твердом растворе, сопровождающегося упрочнением, и, следовательно, их механические свойства. Можно также считать, что подбирая определенные, ранее не использованные соотношения различных редкоземельных металлов в качестве легирующих добавок, можно будет



создать новые магниевые сплавы с лучшими механическими свойствами, чем магниевые сплавы, используемые в настоящее время. В то же время присутствие в магниевых сплавах с редкоземельными металлами, которые характеризуются высокими прочностными свойствами, например, в сплавах системы Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1, некоторых других редкоземельных металлов может оказаться вредным и привести к ухудшению их механических свойств. Такое вредное действие на сплавы Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 оказывает гольмий, который существенно задерживает распад магниевого твердого раствора, сопровождающийся упрочнением, и снижает эффект упрочнения при старении. В общем, можно сделать вывод, что в перспективе использование для легирования новых, ранее не применявшихся сочетаний различных редкоземельных металлов позволит создать новые конструкционные магниевые сплавы для практического применения, характеризующиеся лучшими характеристиками, чем у известных сплавов. В то же время следует отметить, что редкоземельные металлы имеют различную стоимость и некоторые из них весьма дорогие. Этот фактор также должен учитываться при разработке новых промышленных магниевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы.

*Работа выполнялась по государственному заданию №007-00129-1800 и Гранту РФФИ №18-03-00223-а*

## Литература

1. Guillam C.Y.M. Magnesium Supply and Demand Report. // Light Metal Age. 1985. Vol.43. No5/6. P.12-15.
2. Браун Р.Е. Обзор магниевой промышленности. // Цветные металлы. 2002. №4. С.52-56.
3. [On line]: [terger.whotrades.com.>blog/43408453040](http://terger.whotrades.com.>blog/43408453040). Анализ тенденций развития магниевой отрасли. Проведен Соликамским магниевым заводом.
4. [On line]: <http://www.cmmarket.ru>. Мировое производство магния. 2015.
5. Magnesium alloys. Science, Trechnology and Applications ./ Ed. E.Aghion, D.Elizezer. The Israeli Consortium for the Development of Magnesium Technologies. S. Neaman Inst. Technion city Haifa.Israel. 2000. 318p.
6. Buckley A. Magnesium verstaerkt Production und Marketing. // Metall. 1986. B.40. №12. S.1298-1302.
7. Рейнор Г.В. Металловедение магния и его сплавов. Москва. «Металлургия». 1964. 488 с.
8. Price trends for magnesium. // Design Engineering (Great Britain). 1985. Dec. P.30.
9. Magnesium Automotive Application Rising. // Light Metal Age. 1984. Vol.42. No3/4. P.29.
10. Kraus J. Alter bekannter Magnesium gewinnt wieder an Bedeutung bei Druckgussteilen fuer die Automobilindustrie. // Maschinenmarkt. 1996. B.102. No30. S.16-17.

11. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б.Н.Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640с.
12. Rokhlin L.L. Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals. Structure and Properties. Published by Taylor and Francis Inc.. London. UK. 2003. 245p.
13. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. Москва. Из-во «Наука». 1975. 272с.
14. Leontis T.E. The Properties of Sand Cast Magnesium–Rare Earth Alloys. // Journal of Metals. 1949. V.1. No12. P.968-983.
15. Leontis T.E. Effect of Rare-Earth Metals on the Properties of Extruded Magnesium. // Journal of Metals. V.3. No11. P.987-993.
16. Pearson W.B. The Crystal Chemistry and Physics of Metals and Alloys. Wiley-Interscience. A Division of John Wiley and Sons, Inc., New York-London-Sydney-Toronto. 1972.
17. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Королькова И.Г., Поликанова А.С. Исследование фазовых равновесий в богатых магнием сплавах системы Mg-Sm-Tb в твердом состоянии. // Металлы. 2010. №4. С.99-106.
18. Lukynova E.A., Rokhlin L.L., Dobatkina T.V., Korolkova I.G., Tarytina I.E. Investigation of the Mg-Rich Part of the Mg-Dy-Sm Phase Diagram. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2016. V.37. No6. P.664-671.
19. Дриц М.Е., Рохлин Л.Л., Никитина Н.И. и др. Сплав на основе магния. Авторское свидетельство СССР №1010880, Кл.С22с, 23/06. Изобретения, 1997, №29, ч.2, С.438.
20. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Исследование свойств высокопрочного магниевого сплава системы Mg-Y-Gd-Zr. Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. №12. С.15-18.
21. Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г., Тарытина И.Е. Влияние самария на свойства сплавов системы Mg-Y-Gd-Zr. // Металлы. 2018. №1. С.58-63.
22. Twier A.M., Robson J.B., Lorimer G.W., Rogers P.A. A study of the microstructure of cast and extruded Electron 675. Proceedings: “Magnesium, 8<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and their Applications”. Weimar. Germany, WILEI-VCH GmbH&Co, KGaA, 2009. P.469-475.
23. Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г., Тарытина И.Е. Влияние самария на структуру и свойства сплава ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr// Металлы, 2018, №1, С. 58-63.
24. Rokhlin L.L., Lukyanova E.A., Dobatkina T.V., Tarytina I.E., Korolkova I.G. Effect of rare-earth metals (Dy, Tb, Sm, Nd) on structure and mechanical properties of the Mg-Y-Gd-Zr system// Machines.Technologies. Materials, 2017, №7, P. 373-375.