

На правах рукописи



ПЕТРОВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЗМ
ДЕФОРМАЦИИ И АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМ Mg-Zn-Zr-(PЗЭ) И Mg-Li-Al**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2020 г.

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Бецофен Сергей Яковлевич

Официальные оппоненты: – **Рохлин Лазарь Леонович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБУН «ИМЕТ» РАН,
главный научный сотрудник

– **Овчинников Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: – ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет»

Защита диссертации состоится «08» декабря 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3., ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/79f/Disertatsiya_Petrov.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Последние годы характеризуются повышенным интересом к магниевым сплавам в связи с их использованием в электронике, автомобилестроении и медицине. Разработан широкий спектр новых сплавов, наиболее перспективными из которых являются сплавы с РЗМ и литием. РЗМ подразделяют на легкие (лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, скандий) и тяжелые (иттрий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций). Эффективность использования РЗМ в качестве легирующих элементов в магниевых сплавах определяется тем, что все РЗМ обладают такой же как магний ГПУ решеткой, при этом радиус атомов легких РЗМ (кроме Sc и Eu) превышают радиус атома магния на 13–18%, поэтому их растворимость в магнии минимальна и они могут реализовывать дисперсионное упрочнение. Радиусы атомов тяжелых РЗМ (кроме Yb) в силу лантаноидного сжатия превышают радиус атомов магния всего на 9–12%, поэтому их растворимость в магнии существенна и они дают комбинированный эффект за счет упрочнения за счет образования твердого раствора и дисперсионного упрочнения. Легирование РЗМ эффективно воздействует на анизотропию, при этом они могут менять как текстуру, так и механизм деформации. Как правило, легирование в пределах твердого раствора меняет механизм деформации, но не изменяет текстуру. Выделение интерметаллидных фаз не меняет тип текстуры, но может снижать ее интенсивность вплоть до бестекстурного состояния.

Легирование литием существенно снижает плотность сплавов, а также повышает пластичность магния за счет образования ОЦК фазы на основе лития. Результаты многочисленных исследований магниевых сплавов показали, что их механические свойства практически невозможно интерпретировать, а тем более прогнозировать без информации о текстуре и действующих механизмах деформации. Добавление легирующих элементов может изменять как текстуру, так и механизм деформации, что затрудняет поиск надежных корреляций между легированием магниевых сплавов, текстурой и анизотропией свойств. В этой связи до сих пор актуальными являются исследования закономерностей влияния различных легирующих элементов на механизм деформации и анизотропию механических свойств.

Целью работы являлось повышение надежности применения магниевых сплавов в электронике, аэрокосмической технике и медицине за счет управления анизотропией механических свойств в полуфабрикатах и изделиях из этих сплавов, на основе выявленных для них закономерностей влияния легирующих элементов на механизм деформации и формирование текстуры.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие основные задачи:

- 1) Исследовать формирование фазового состава, структуры, кристаллографической текстуры и анизотропии механических свойств в прессованных полуфабрикатах сплавов MA14 (Mg-Zn-Zr), ВМД7-1 (Mg-Y-Nd-Zn-Zr) и Mg-5Li-3Al, листах сплава Mg-9Li-1Al и трубах сплава MA14.
- 2) На основе анализа изменения ориентации зерен при испытании на сжатие сплавов Mg-Zn-Zr, Mg-Y-Nd-Zn-Zr и Mg-5Li-3Al определить механизм деформации и оценить влияние на него и анизотропию механических свойств легирующих элементов в сплавах.
- 3) Применительно к трубным заготовкам из сплава MA14 разработать процедуру расчета контуров текучести в соответствии с критерием текучести Хилла, позволяющую оценить напряжения течения при любом виде напряженного состояния на основе результатов испытаний на растяжение в осевом направлении трубы и текстурных данных.

Научная новизна:

1. Развита новый подход к оценке работоспособности трубных заготовок из магниевых сплавов с использованием анизотропного критерия Хилла, для которого параметры анизотропии P и R оценивали на основе результатов испытаний на растяжение в осевом направлении трубы, текстурных данных в виде факторов Закса для трех ортогональных направлений трубы и найденного ранее соотношения между прочностной и текстурной анизотропией.
2. Для листов сплава Mg-9Li-1Al с двухфазной ГПУ+ОЦК структурой обнаружено, что твердый раствор на основе Mg с ГПУ решеткой характеризуется типичной базисной текстурой прокатки, в то время как текстура твердого раствора на основе лития имеет текстуру $\{110\}$, которая отличается от текстуры прокатки ОЦК металлов, но полностью соответствует текстуре фазового превращения ГПУ→ОЦК в соответствии с ориентационными соотношениями Бюргерса: $(0001)_{\text{ГПУ}} // (011)_{\text{ОЦК}}$.
3. Испытаниями на сжатие образцов с исходной призматической текстурой обнаружено, что в сплаве системы Mg-Zn-Zr (MA14) также как в чистом магнии и сплавах Mg-Al-Zn действует легкое $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$ «растягивающее» двойникование, что обуславливает более низкую величину сопротивления деформации при сжатии по сравнению с растяжением, когда действуют системы с более высокими напряжениями сдвига.
4. В сплавах магния с иттрием и литием деформация в призматических направлениях осуществляется не двойникованием, а призматическим скольжением, что обусловлено в случае иттрия запретом двойникования из-за упорядочения твердого раствора, а в случае лития изменением характера сил межатомной связи, при этом иттрий блокирует легкое «растягивающее»

двойникование из-за эффекта упорядочения твердого раствора, а литий увеличивает предпочтительность призматического скольжения за счет относительного ослабления сил связи вдоль оси «а», что проявляется также в уменьшении осевого отношения «с/а».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны новые методические подходы к исследованиям влияния механизма деформации и кристаллографической текстуры на анизотропию механических свойств полуфабрикатов и изделий из магниевых сплавов, включающие оценку особенностей механизма деформации сплавов различных систем легирования с помощью изменения ориентации кристаллитов при испытании на сжатие, а также прогнозирование прочности текстурированных магниевых труб в условиях сложнапряженного состояния на основе анизотропного критерия текучести Хилла с использованием текстурных данных и результатов испытания на растяжение в осевом направлении трубы.
2. Установлены закономерности влияния легирующих элементов на механизм деформации и анизотропию механических свойств текстурированных полуфабрикатов, позволяющие создавать изотропные сплавы или сплавы с заданной анизотропией механических свойств.
3. Показано, что легирование литием даже в пределах ГПУ твердого раствора позволяет получить практически изотропный материал, а легирование иттрием повышает прочность на сжатие в долевом направлении прутков с призматической текстурой, но сохраняет низкие показатели прочности в близком к бестекстурному поперечном направлении прутков.

Методология и методы исследования

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных учёных, государственные стандарты РФ.

Диссертационная работа выполнена с использованием современных методов исследования: рентгеноструктурный и текстурный анализы, оптическая и растровая электронная микроскопия, электро-зондовый микроанализ, испытания на растяжение и сжатие при нормальной температуре.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки анизотропии механических свойств магниевых сплавов.
2. Закономерности влияния легирующих элементов на механизм деформации и анизотропию механических свойств магниевых сплавов.
3. Оценка работоспособности трубных заготовок из магниевых сплавов на основе критерия текучести Хилла.
4. Закономерности влияния параметров кристаллических решеток фаз на

формирование текстуры в магниевых сплавах при холодной пластической деформации.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на современном, поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно - технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO).

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы доложены на 5 конференциях: на Международной молодежной научной конференции XLI Гагаринские чтения, г. Москва, МАИ, 2015 г., Международной молодежной научной конференции XLII Гагаринские чтения, г. Москва, МАИ, 2016 г., Международной молодежной научной конференции XLIII Гагаринские чтения, г. Москва, МАИ, 2017 г., Международной молодежной конференции «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, КАИ, 2017 г., Международной научно-практической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2020» (ICMSSTE 2020), 25-29 мая 2020, г.Ялта.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 8 научных работах, в том числе 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 4 статьи входят в Международную систему научного цитирования Scopus. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 71 рисунок, 12 таблиц и список литературы из 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Цель работы и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость, перечислены полученные автором результаты.

Глава 1. Влияние легирования на механизм пластической деформации, текстуру и анизотропию механических свойств магниевых сплавов (обзор литературы).

В первой главе представлен анализ литературы по теме работы, в обзоре рассмотрено влияние легирующих элементов, прежде всего РЗМ и лития на механизмы скольжения, двойникования и кристаллографическую текстуру сплавов на основе магния. Проанализировано влияние текстуры на механические и коррозионные свойства магниевых сплавов, а также на их анизотропию, рассмотрено применение магниевых сплавов в медицине.

Глава 2. Материалы и методы исследования

Во второй главе приведены химический состав и основные характеристики исследуемых магниевых сплавов и описаны методики испытаний и исследований.

Исследования проводили на прутках $\varnothing 20$ мм сплава МА14 (Mg – 5,5Zn – 0,8Zr), прутках $\varnothing 50$ мм сплава ВМД7-1(Mg-Y-Nd-Zn-Zr), прутках $\varnothing 15$ и 25 мм из сплава Mg-5,5Li-3Al, 2 мм листах сплава Mg-9Li-1Al, прессованных трубах $\varnothing 105$ мм и толщиной стенки 5 мм из сплава МА14 и сплаве Mg-7Li-5Al в виде слитка. Полуфабрикаты были получены по промышленной технологии, последним этапом которой были прокатка или экструзия при температурах $300 \div 350^\circ\text{C}$.

Испытания на растяжение проводились на универсальной разрывной машине TIRAtest 2300 (ГОСТ 28840 1497-84). Подготовка образцов для проведения механических испытаний на растяжение осуществлялась согласно ГОСТ 1497-84. Для испытаний на сжатие были подготовлены призматические образцы типа III, согласно ГОСТ 25.503-97. Размеры образцов для оси сжатия соответствующей направлению ПН (перпендикулярно оси прутка) составляли 14x10, а для направления ОН (осевое направление) 10x6 мм.

Металлографические исследования проводились методами оптической и растровой металлографии на оптических микроскопах Leica DM IRM и Olympus GX51, а так же на растровом сканирующем микроскопе FEI Verios 460 XHR в режимах вторичных и обратно отражённых электронов, в том числе с использованием электронно – зондового микроанализа.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-7 в фильтрованном K_α медном излучении. Текстуры определяли с помощью количественных обратных полюсных фигур (ОПФ), для чего снимали полные спектры в интервале углов дифракции $2\Theta = 25-150^\circ$ для образцов, вырезанных из различных сечений, нормальных специфическим направлениям полуфабрикатов. В случае прутков это осевое и поперечное направления (ОН и ПН, соответственно), для листов это направление нормали к листу (НН), направление прокатки (НП) и поперечное направление (ПН), для труб это

образцы 4-х типов: осевые (ОН), тангенциальные (ТН) и радиальные образцы для двух сечений примыкающих к внешней (РН-1) и внутренней (РН-2) поверхностям трубы. Нормированные значения полюсных плотностей рефлексов (P_{hkl}) находили из соотношения:

$$P_{hkl} = \frac{(I_{hkl} / R_{hkl})_i}{\sum_{i=1}^{17} (A_{hkl} \cdot I_{hkl} / R_{hkl})_i} \quad (1)$$

Где: I_{hkl} , R_{hkl} и A_{hkl} – соответственно интенсивность текстурированного образца, бестекстурного эталона и нормировочный коэффициент для рефлекса hkl .

Для количественной оценки вклада текстуры полуфабрикатов из магниевых сплавов в анизотропию прочностных свойств использовали расчетные значения факторов Закса (M) для базисного скольжения:

$$\sigma_T = \tau_K / \Phi = \tau_K M$$

Где: σ_T – напряжение текучести; τ_K – критическое приведенное напряжение сдвига.

Усреднение производили по факторам Шмида для всех ориентировок ($n=17$) на ОПФ для всех типов образцов с учетом полюсной плотности рефлексов (P_{hkl}) и доли этой ориентировки A_{hkl} , а затем определяли среднюю величину \bar{M} как обратную среднему значению $\bar{\Phi}$:

$$\bar{M}_{ОН(ПН)} = 1 / \bar{\Phi}_{ОН(ПН)}; \quad \bar{\Phi}_{ОН(ПН)} = \sum_{i=1}^{17} (P_{hkl} \Phi_{hkl}^{0\alpha\beta} A_{hkl})_i \quad (2)$$

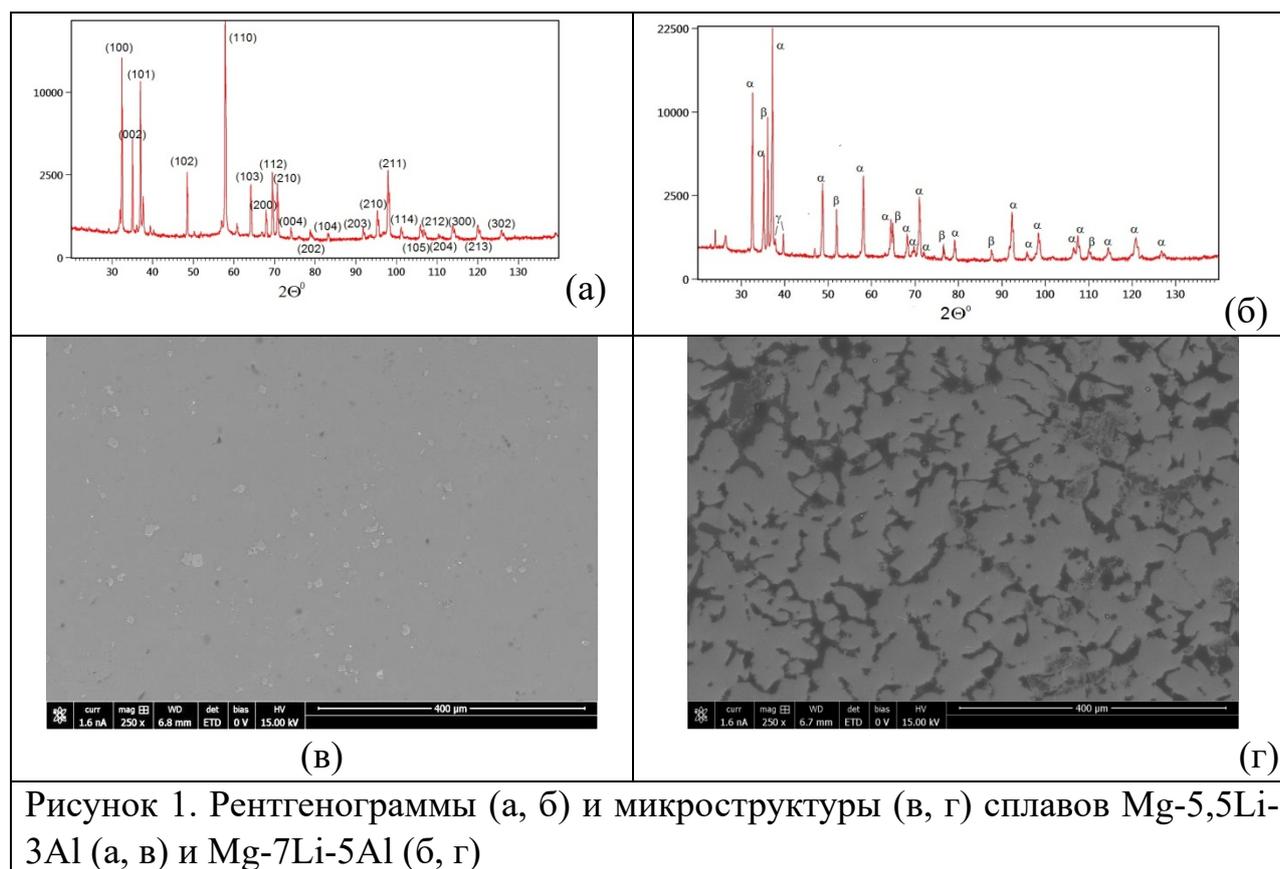
Глава 3. Исследование фазового состава, структуры и механических свойств сплавов системы Mg – Li – Al

В этой главе исследовали фазовый состав и структуру сплавов системы Mg-Li-Al, в которых содержание лития варьировалось от 5,5% (однофазная область ГПУ фазы) до 9% (двухфазная область с доминированием ОЦК β -фазы). Текстура и механические свойства прутков сплава Mg-5,5Li-3Al будет рассмотрена в следующей главе, сравнительно с прутками других сплавов.

Сплав Mg-5,5Li-3Al является однофазным, о чем свидетельствует его рентгенограмма (рис. 1а) и микроструктура (рис. 1в). На рентгенограмме сплава Mg-7Li-5Al (рис. 1б) помимо рефлексов от ГПУ твердого раствора Mg присутствуют отчетливые рефлексы от ОЦК β -фазы. На микрофотографии, полученной на СЭМ с помощью детекторов обратноотраженных электронов (рис. 1г) β -фаза на основе Li с меньшим атомным номером видна в виде темных прослоек между доминирующей в этом сплаве светлой α -фазой на основе Mg. На рентгенограммах помимо рефлексов от твердых растворов присутствуют также линии от γ -интерметаллида $Mg_{17}Al_{12}$.

На рисунке 2 (а – в) приведены рентгенограммы 2 мм листов сплава Mg-9Li-1Al, полученные от трех сечении, нормальных к НН, НП и ПН, а

также полученные с помощью СЭМ микроструктура листа сплава (рис. 2г). В этом сплаве уже доминирует ОЦК твердый раствор на основе Li. Это видно по соотношению интенсивностей соответствующих линий на рентгенограммах, а также микрофотографии, полученных СЭМ в обратноотраженных электронах (рис. 2г). На рентгенограммах заметны различия в соотношениях интенсивностей для разных рефлексов, что свидетельствует о наличии текстуры листа. На рисунке 3 приведены ОПФ для обеих фаз в трех ортогональных направлениях.



Видно, что α -фаза характеризуется типичной для текстуры прокатки магниевых сплавов базисной текстурой, в то время как текстура β -фазы на основе лития имеет текстуру $\{110\}$, которая не соответствует текстуре прокатки ОЦК металлов, но полностью соответствует текстуре фазового превращения ГПУ фазы с базисной текстурой в ОЦК фазу с текстурой $\{110\}$ в соответствии с ориентационными соотношениями (ОС) Бюргера: $(0001)_{\text{ГПУ}} // (110)_{\text{ОЦК}}$.

В таблице 1 приведены результаты механических испытаний листов сплава, которые показывают незначительную анизотропию механических свойств, которая характерна для сплавов с литием.

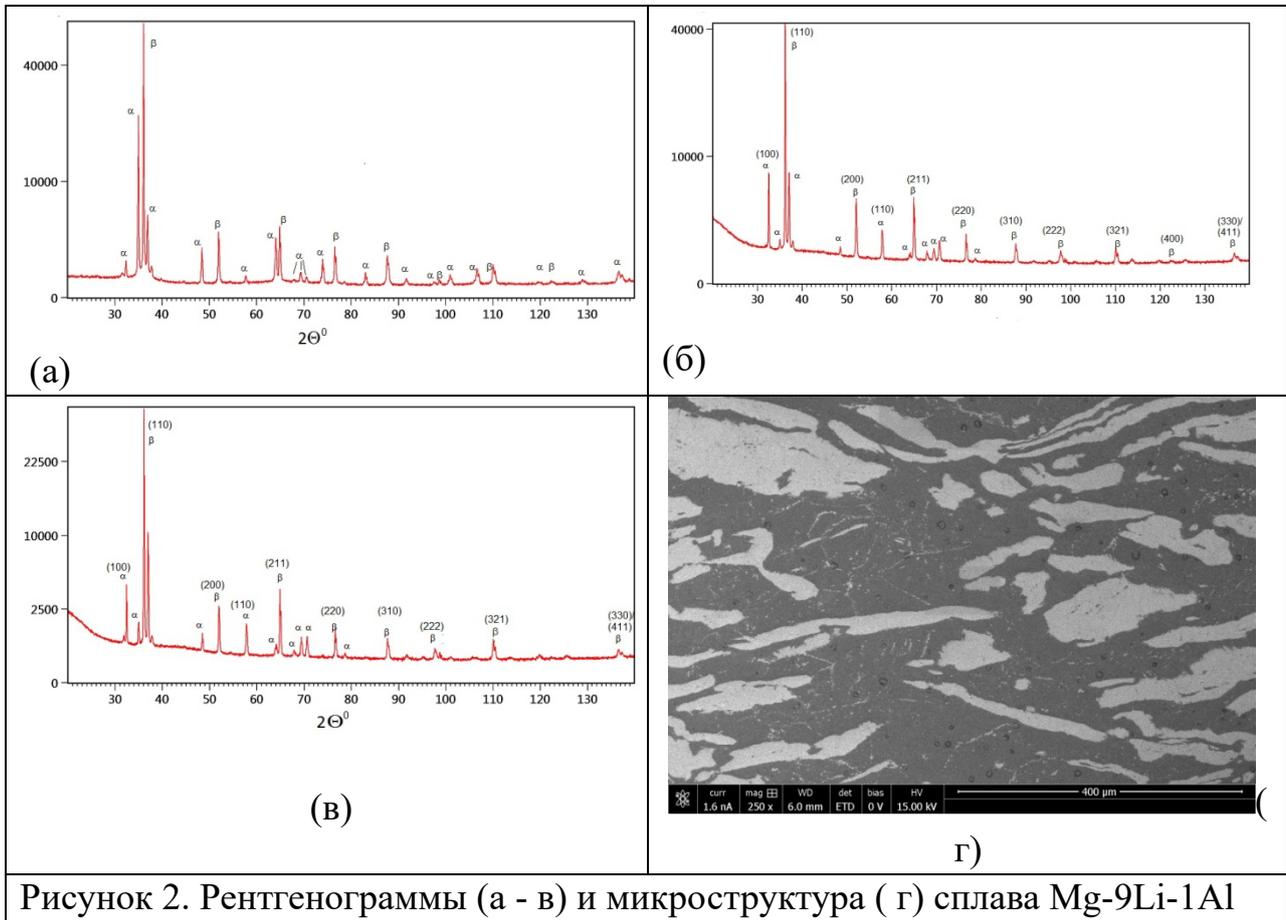


Рисунок 2. Рентгенограммы (а - в) и микроструктура (г) сплава Mg-9Li-1Al

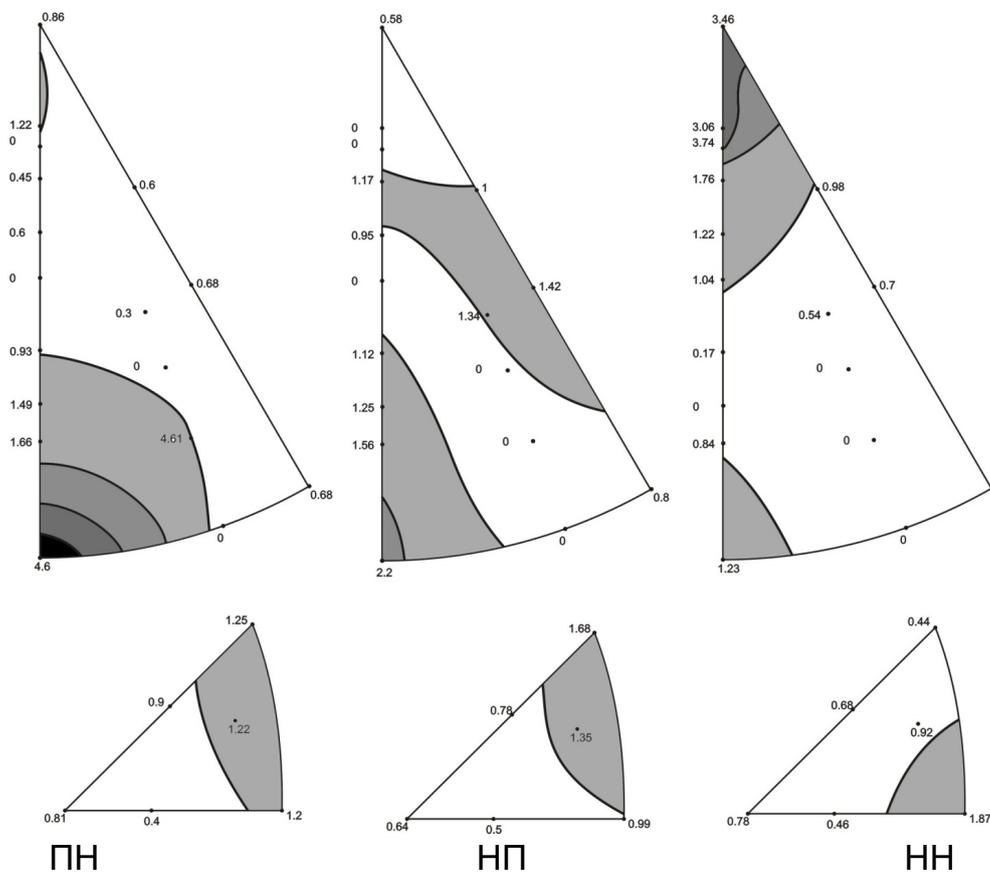


Рисунок 3. Полусные фигуры в прокатанном листе из сплава в зависимости от направления

Результаты механических испытаний на растяжение для сплава

Mg – 9Li – 1Al

	НП	ПН
$\sigma_{0,2}$, [МПа]	176	195
σ_B , [МПа]	215	220
δ , %	28,5	16,7
ψ , %	42,3	26,6

Глава 4. Исследование механизма деформации, текстуры и анизотропии механических свойств сплавов МА14, ВМД7-1 и Mg-5Li-3Al

В этой главе с помощью построения обратных полюсных фигур на последовательных стадиях испытания сжатием на 1-6% в долевом и поперечном направлениях пресованных прутков из сплавов МА14(Mg-Zn-Zr), ВМД7-1 (Mg-Y-Nd-Zn-Zr) и Mg-5Li-3Al определяли влияние легирования на действующие механизмы деформации. Рассчитывали ориентационные факторы Закса для базисного скольжения и оценивали вклад текстуры и механизма деформации в анизотропию механических свойств при испытании на растяжение и сжатие.

На рисунке 4 приведены ОПФ для образцов из прутка сплава МА14 в исходном состоянии и образцов, испытанных на сжатие в ОН со степенью деформации 3,2% (рис. 4б) и 5,7% (рис. 4в). В исходном состоянии текстура прутка имеет типичную для текстур прессования ГПУ сплавов выраженную призматическую текстуру (рис. 4а). С увеличением степени деформации происходит переориентация зерен призматической текстуры в базисную ориентировку, что однозначно свидетельствует об активности «растягивающего» двойникового (РД) $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$, которое действует при растяжении вдоль оси «с» и сжатии вдоль оси «а» ГПУ решетки. Это двойникование дает переориентировку на $86,5^\circ$, что почти точно соответствует переориентации от призмы к базису. На рисунке 5 приведены значения прочности на растяжение вдоль направления (ОН), а также на сжатие вдоль ОН и ПН прутка. Эти результаты показывают, что предел текучести на растяжение (304 МПа) значительно выше, чем при испытании на сжатие в том же направлении (260 МПа), при этом испытания на сжатие в ПН дали такой же результат, что и сжатие в ОН (рис. 5а). Из этих данных можно сделать несколько выводов. При растяжении вдоль ОН действует «сжимающее» двойникование $\{10\bar{1}1\} \langle 10\bar{1}2 \rangle$ (СД) критические приведенные напряжения сдвига (*КПНС*) для которого существенно выше, чем для «растягивающего» двойникового.

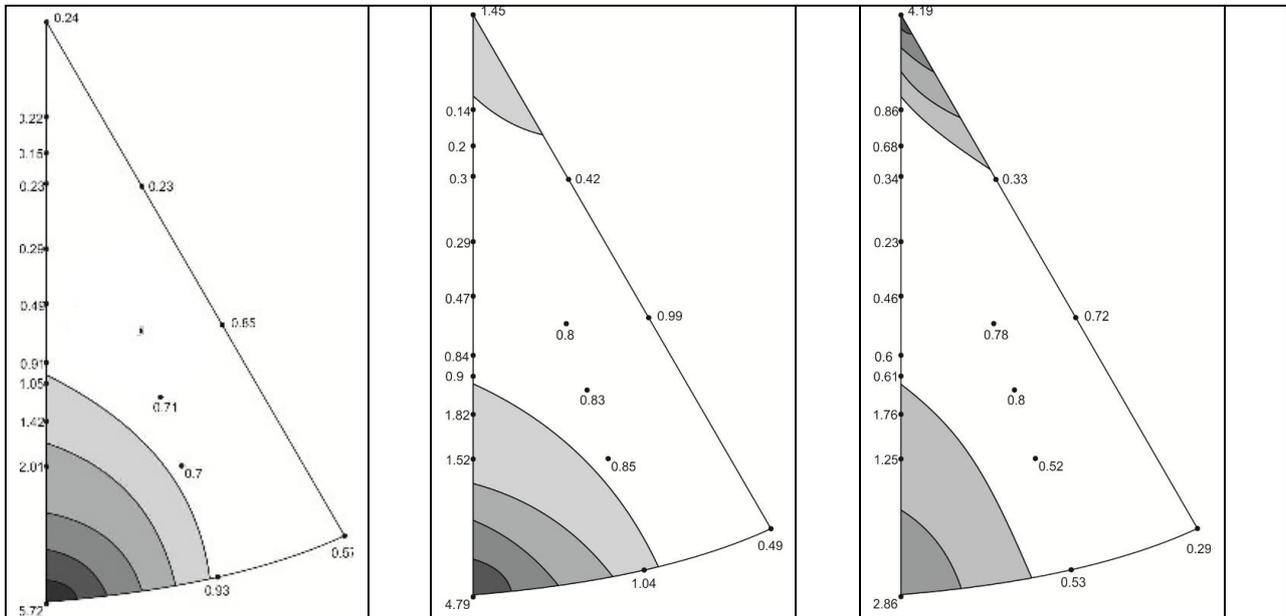


Рисунок 4. ОПФ для ОН прутка сплава МА14 в исходном состоянии (а), после деформации сжатием на 3,2% (б) и $\epsilon=5,7\%$ (в).

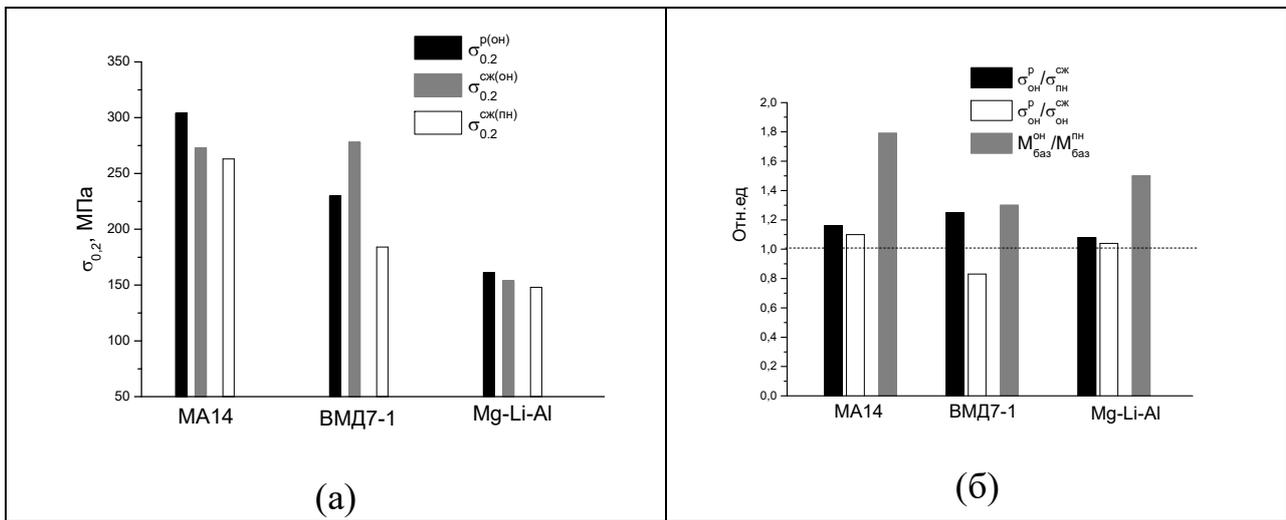
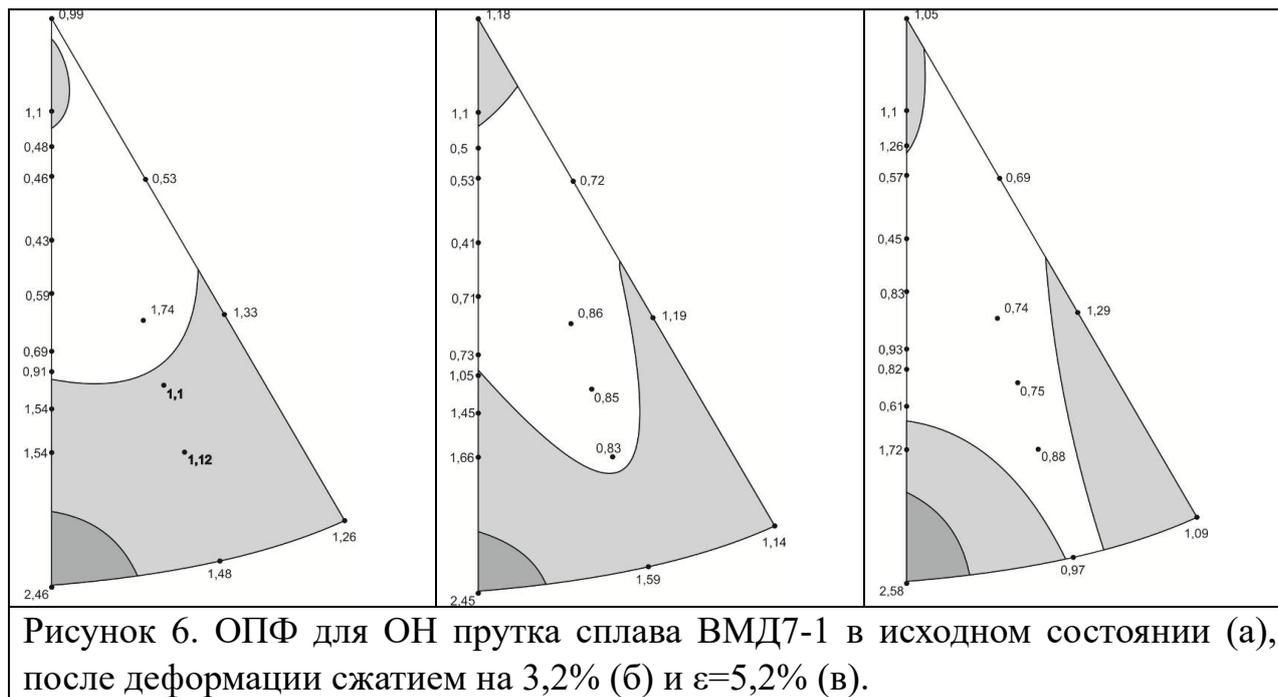


Рисунок 5. Механические свойства при испытаниях на растяжение и сжатие (а) и показатели анизотропии этих свойств (б) для сплавов магния различных систем легирования

Испытания на сжатие вдоль ПН, ориентация зерен в котором благоприятно для базисного скольжения приводит к небольшим изменениям их ориентации, свидетельствующим об активности базисного скольжения. Близкие значения пределов текучести на сжатие вдоль ОН и ПН свидетельствует о том, что КПНС для РД и базисного скольжения, которое активно для испытания в ПН, близки по величине, поскольку значения факторов Шмида для РД в направлении ОН и базисного скольжения для ПН примерно равны ($\sim 0,4$).

На рисунке 6 приведены ОПФ для прутка из сплава ВМД7-1 в исходном состоянии (рис. 6а) и после испытания на сжатие в ОН со степенью деформации 3,2% (рис. 6б) и 5,2% (рис. 6в). В исходном состоянии текстура

прутков сплава менее выражена по сравнению со сплавом МА14 (рис. 4а). Деформация сжатием в отличие от МА14 не приводит к переориентации зерен призматической текстуры в базисную ориентировку, что свидетельствует о блокировке РД. Это результат легирования иттрием, который приводит к упорядочению твердого раствора, что препятствует двойникованию, которое нарушает «порядок» решетки, вследствие чего при растяжении и сжатии в сплаве действует призматическое скольжение. В результате сплав проявляет аномальную для магниевых сплавов анизотропию, когда прочность на сжатие выше, чем на растяжение (рис. 5а).



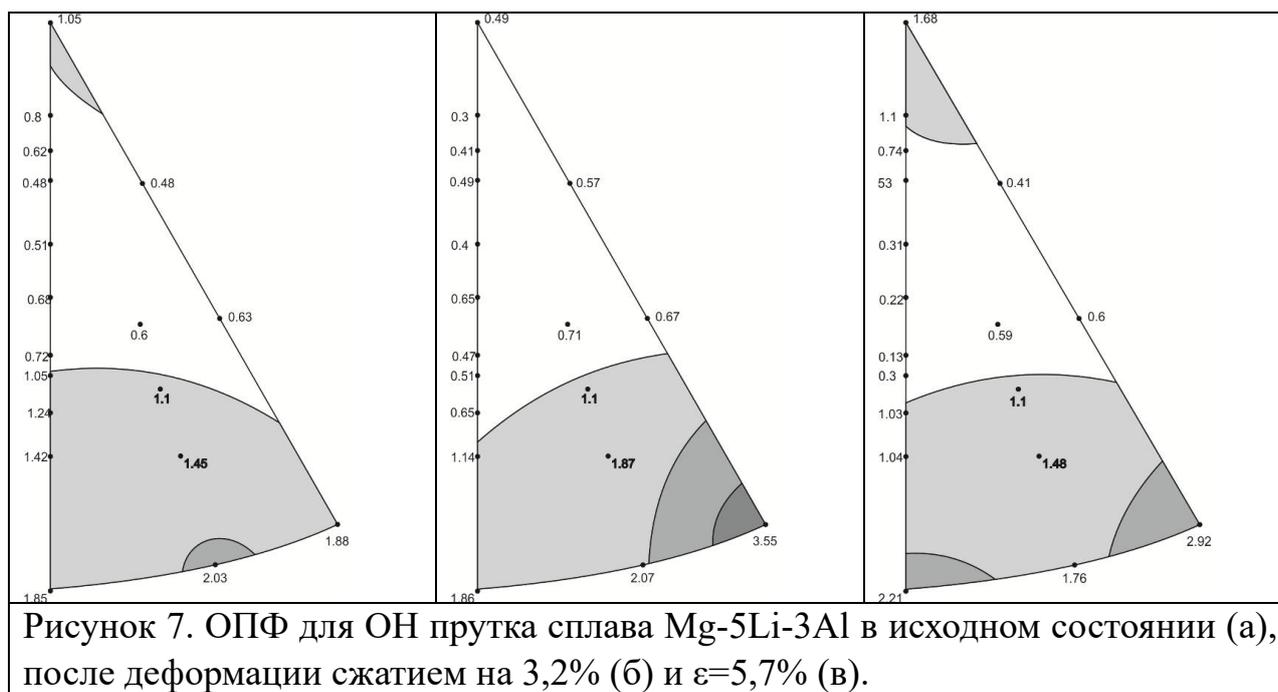
Важно отметить, что для сплавов с иттрием в большинстве случаев прочностные характеристики при сжатии и растяжении одинаковы, поскольку в случае выраженной призматической текстуры практически все зерна деформируются призматическим скольжением, которое не зависит от знака деформации. В нашем случае разница в прочностных характеристиках обусловлена пониженной интенсивностью призматической текстуры, когда значительная часть зерен имеет близкую к оси «с» ориентировку и вынуждена деформироваться двойникованием, при этом сжатие вдоль оси «с» реализуется за счет «сжимающего» двойникования, а растяжение за счет значительно более легкого «растягивающего» двойникования. В результате получаем парадоксальный результат, когда в результате менее выраженной призматической текстуры прутков анизотропия их свойств выше, чем была бы в случае более выраженной призматической текстуры.

Изменение текстуры сплава при испытании в ПН также, как и для сплава МА14 свидетельствует об активности базисного скольжения, при этом характер анизотропии сплава показывает, что величина КПНС для базисного

скольжения ниже, чем для сплава МА14. Этот вывод следует из сопоставления отношения пределов текучести вдоль оси прутка и поперечного направления, которое выше, чем для МА14 (1,25 и 1,16 на рис. 5б), притом, что степень текстурированности прутков сплава МА14 выше, чем для сплава ВМД7-1. Степень текстурированности прутков можно количественно оценить коэффициентом текстурной анизотропии $K_a^T = M_{\text{осз}}^{\text{ОН}} / M_{\text{осз}}^{\text{ПН}}$, величина которого определяет степень текстурированности. $K_a^T = 1,79$ для сплава МА14 (рис. 5б), что свидетельствует о том, что прутки этого сплава с точки зрения степени текстурированности имеют максимальный потенциал для анизотропии свойств, $K_a^T = 1,5$ для сплава Mg-5Li-3Al и только 1,3 для сплава ВМД7-1.

Таким образом, для сплава ВМД7-1 анизотропия значительно отличается от остальных сплавов магния тем, что в результате легирования иттрием в нем устраняется отрицательный эффект легкого «растягивающего» двойникования, которое ослабляет сопротивление деформации при сжатии вдоль оси магниевых прутков, а с другой стороны еще больше снижает прочность в поперечном направлении прутков из-за того, что снижает КПНС для и без того сверхлегкого базисного скольжения. Вероятно, по этой причине не получили развитие двухкомпонентные Mg-Y сплавы, в которых имела место более высокая, чем в других сплавах магния анизотропия из-за сверхлегкого базисного скольжения, а также за счет формирования более острой призматической текстуры из-за отсутствия процесса ее раздвойникования.

На рисунке 7 приведены ОПФ для прутка из сплава Mg-5Li-3Al в исходном состоянии (рис. 7а) и после испытания на сжатие в ОН со степенью деформации 3,6% (рис. 7б) и 5,5% (рис. 7в). В исходном состоянии текстура прутка соответствует текстуре прессования призматического типа, но менее выраженную, чем для сплава МА14 (рис. 4а), и более выраженную, чем ВМД7-1 (рис. 6а). При деформации сжатием в отличие от МА14 и аналогично сплаву ВМД7-1 не происходит переориентации зерен призматической текстуры в базисную ориентировку, что свидетельствует о блокировке РД и активности призматического скольжения. Однако ситуация в сплаве Mg-5Li-3Al принципиально отличается от ВМД7-1, в котором призматическое скольжение действует вынужденно, поскольку затруднено РД и это приводит только к усилению разницы в пределах текучести вдоль ОН и ПН. В сплаве Mg-5Li-3Al активность призматического скольжения обусловлена тем, что легирование литием изменяет характер межатомной связи, в результате чего увеличивается предпочтительность призматического скольжения за счет относительного ослабления сил связи вдоль оси «а», что проявляется в уменьшении осевого отношения «с/а» от 1,625 для чистого магния до 1,607.



На рисунке 5а приведены значения прочности на растяжение вдоль того же направления (ОН), а также на сжатие вдоль ОН и ПН прутка. Эти результаты показывают, что предел текучести на растяжение (161 МПа), на сжатие в том же направлении (154 МПа) и на сжатие в ПН (148 МПа) близки по величине, что дополнительно к текстурным исследованиям свидетельствует о специфике механизма деформации сплава, который принципиально отличается от всех магниевых сплавов.

Глава 5. Параметры анизотропии прессованных труб из сплава МА14, полученных методами гранульной металлургии

В этой главе для интерпретации анизотропии свойств экструдированных труб из гранул сплава МА14 разработана процедура расчета контуров текучести анизотропных текстурированных полуфабрикатов, позволяющая оценить напряжения течения при любом виде напряженного состояния на основе анизотропного критерия текучести Хилла.

Для всех 4-х исследованных труб (табл. 2) текстура характеризуется расположением призматических полюсов $\langle hkl0 \rangle$ в осевом направлении, что соответствует текстуре вытяжки. Текстура в тангенциальном и радиальном направлениях отличается, что свидетельствует о том, что в отличие от прессования цельных профилей симметричных относительно оси вытяжки, при прессовании труб отсутствует аксиальная симметрия текстуры. Это обусловлено тем, что при деформации полых профилей в зависимости от размеров заготовки и прессованной трубы деформация сжатия по толщине трубы (в радиальном направлении) отличается от деформации сжатия по диаметру (в тангенциальном направлении). Соответственно ось «с» ГПУ

решетки располагается предпочтительно в том направлении, в котором деформация сжатия выше. В нашем случае коэффициент $Q = \ln(t/t_0)/\ln(D/D_0) > 1$ и поэтому ось «с» располагается предпочтительно в радиальном направлении.

Таблица 2

Параметры прессования и механические свойства труб из сплава МА14

№трубы	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относ.удлин. %	V, м/мин	Т-ра брикета °С
1	245,0	200,0	12,0	0,95	300
2	242,5	195,0	12,0	0,8	340
3	235,0	202,5	11,5	1,2	300
4	250,0	217,5	12,0	0,7	270

Для описания деформационного поведения текстурированных труб из циркониевых сплавов в условиях сложнонапряженного состояния используют критерий текучести Хилла. Аналогичный подход может быть использован для любых текстурированных труб, в том числе и для труб из магниевых сплавов. Для случая плоского напряженного состояния ($\sigma_3 = 0$) в координатах главных напряжений σ_1 и σ_2 критерий Хилла имеет вид:

$$P(R + 1)\sigma_1^2 - 2RP\sigma_1\sigma_2 + R(P + 1)\sigma_2^2 = P(R + 1)\sigma_{он}^2 = R(P + 1)\sigma_{тн}^2 \quad (3)$$

где: $R = d\varepsilon_2 / d\varepsilon_3$; $P = d\varepsilon_1 / d\varepsilon_3$ – коэффициенты анизотропии, $\sigma_{он}$ – предел текучести в осевом направлении трубы (направление 1//ОН);

Уравнение (3) позволяет определить отношение предела текучести при сложнонапряженном состоянии (σ_2), характеризуемом отношением $m = \sigma_2 / \sigma_1$, к пределу текучести при одноосном растяжении ($\sigma_{он}$).

$$\sigma_2 / \sigma_{он} = \sqrt{\frac{4R(P + 1)}{m^2RP + m^2R - 2mPR + PR + P}} \quad (4)$$

Большинство труб работают в условиях внутреннего давления, которому соответствует напряженное состояние несбалансированного двухосного растяжения ($\sigma_2 = 2\sigma_1$). Подставив в (4) $m=2$ получим:

$$\sigma_2 / \sigma_{он} = \sqrt{\frac{4P(R + 1)}{RP + 4R + P}} \quad (5)$$

В данном случае σ_2 это величина приложенного напряжения вдоль тангенциального направления трубы, при котором начнется пластическая

деформация трубы в условиях внутреннего давления. Величина этого напряжения в зависимости от величин параметров анизотропии P и R может быть как больше, так и меньше предела текучести при одноосном растяжении вдоль тангенциального направления трубы (σ_{mn}). Поскольку допустимые значения прочности трубы устанавливаются на основе результатов одноосных испытаний, то для обеспечения надежной эксплуатации этих труб важно оценить разницу между результатами одноосных испытаний и прочностью при двухосном напряженном состоянии, соответствующем условиям работы трубы.

Для бестекстурного материала $R=P=1$ и уравнение (5) дает: $\sigma_2/\sigma_{mn} = 1,155$, т.е. такую же величину, как и изотропный критерий Мизеса, что подтверждает универсальный характер квадратичного критерия Хилла, который для изотропного материала эквивалентен критерию Мизеса. Для оценки отношения σ_2/σ_{mn} для анизотропного текстурированного материала необходимо определить параметры анизотропии P и R . Для этого можно рассчитать их на основе текстурных данных с помощью усреднения ориентационных факторов Шмида в соответствии с уравнением (2).

Отношение пределов текучести для двух произвольных направлений трубы можно оценить с помощью соотношения между прочностной и текстурной анизотропией. для двух направлений магниевого полуфабриката ($K_{\sigma}^{i,j} = \sigma_i / \sigma_j$) на основе рассчитанных из текстурных данных для этих направлений факторов Закса (M_i/M_j):

$$K_{\sigma}^{i,j} = 0,34 \frac{M_i}{M_j} + 0,59 \quad (6)$$

Параметры анизотропии можно получить в виде решения уравнения (3), для двух произвольных напряженных состояний. Для случая одноосного растяжения в осевом направлении трубы $\sigma_2=0$ и $\sigma_1=\sigma_{он}$ и подставив эти значения в (3) получим:

$$\sigma_{он} / \sigma_{mn} = \sqrt{\frac{R(P+1)}{P(R+1)}} = K_{\sigma}^{он/mn} \quad (7)$$

Для случая сбалансированного двухосного растяжения $\sigma_1=\sigma_2$ и оба этих напряжения равны $\sigma_{рн}$, поскольку это напряженное состояние эквивалентно с точностью до гидростатической компоненты сжатию в НН. Тогда из уравнения (6) следует:

$$\sigma_{рн} / \sigma_{mn} = \sqrt{\frac{R(P+1)}{R+P}} = K_{\sigma}^{рн/mn} \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (7) и (8) получим значения параметров анизотропии:

$$P = \frac{K_{\sigma}^{рн/тн} - K_{\sigma}^{он/тн} + K_{\sigma}^{он/тн} \square K_{\sigma}^{рн/тн}}{K_{\sigma}^{он/тн} - K_{\sigma}^{рн/тн} + K_{\sigma}^{он/тн} \square K_{\sigma}^{рн/тн}} \quad (9)$$

$$R = \frac{K_{\sigma}^{рн/тн}}{P - K_{\sigma}^{рн/тн} + 1} P$$

Рассчитанные значения параметров анизотропии для 4-х труб приведены в таблице 3. Определив значения параметров анизотропии, можно с помощью уравнения (4) оценить значения пределов текучести для каждой из труб для любого напряженного состояния, т.е. построить контур текучести. В таблице 3 приведены рассчитанные с помощью уравнения (4) значения пределов текучести для 4-х труб в тангенциальном ($\sigma_{тн}$), радиальном ($\sigma_{рн}$) направлениях и величина напряжения текучести в тангенциальном направлении трубы в условиях внутреннего давления (σ_2).

Таблица 3

Расчетные данные для определения параметров анизотропии труб

№	$M_{он}$	$M_{тн}$	$M_{рн}$	$M_{он} / M_{тн}$	$M_{рн} / M_{тн}$	$K_{\sigma}^{он/тн} = \sigma_{он}/\sigma_{тн}$	$K_{\sigma}^{рн/тн} = \sigma_{рн}/\sigma_{тн}$	P	R
1	3,905	2,884	3,576	1,354	1,240	1,103	1,023	0,868	1,052
2	3,357	4,728	3,382	0,710	0,715	0,691	0,694	1,013	0,533
3	4,137	3,866	2,836	1,070	0,734	0,910	0,705	0,515	0,448
4	4,624	4,342	3,291	1,065	0,758	0,906	0,719	0,552	0,476

На рисунке 8 приведены контуры текучести для исследования 4-х труб, которые наглядно демонстрируют как меняется величина напряжений в зависимости от вида напряженного состояния. Важно отметить, что труба 2 показала минимальную величину предела текучести при растяжении в осевом напряжении (195 МПа), но при этом для траекторий текучести в диапазоне $m=0,9 \div \infty$, включая трубу под внутренним давлением ($m=2$) напряжения текучести для этой трубы максимальны (253 МПа). Это показывает, что для изделий из магниевых сплавов, которые эксплуатируют при сложнонапряженном состоянии необходимо учитывать фактор анизотропии, обусловленный текстурой при оценке работоспособности изделия при конкретном виде напряженного состояния.

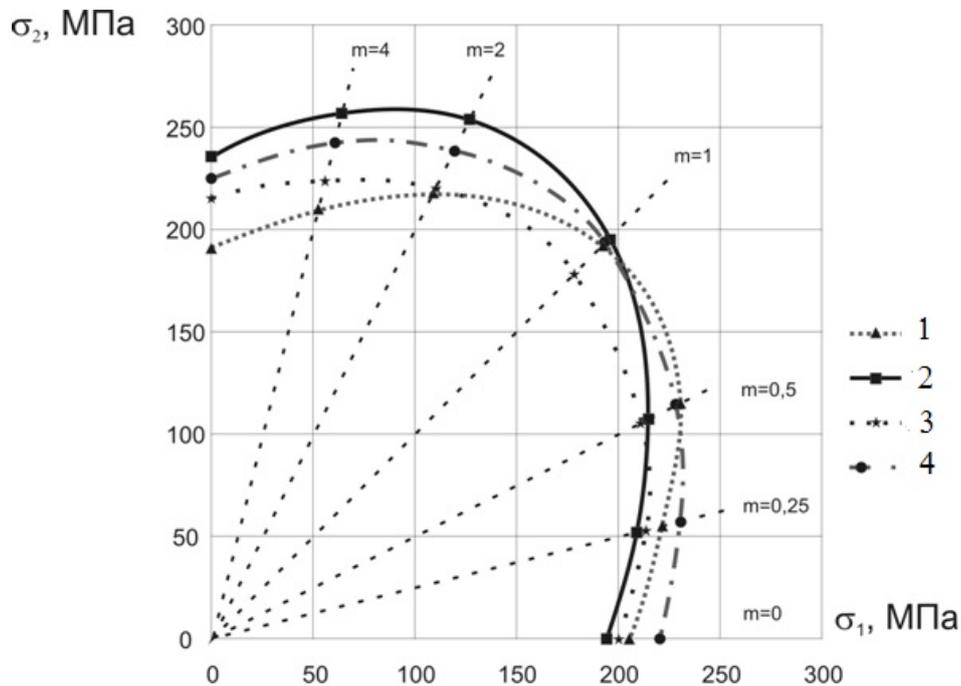


Рисунок 8. Контуры текучести в координатах главных напряжений для 4-х труб, рассчитанных из экспериментальных величин пределов текучести в ОН ($m=0$) и рассчитанных из уравнения (4) для траекторий нагружения $m=0,25$; $0,5$; 1 ; 2 ; 4 ; ∞

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Показано, что в сплаве Mg-5Li-3Al формируется твердый раствор лития в магнии с ГПУ решеткой и с периодами $a=318,4$ пм и $c=512,2$ пм; в сплаве Mg-9Li-1Al кроме ГПУ твердого раствора присутствует также твердый раствор магния в литии с ОЦК решеткой и периодом $351,4$ пм.
2. В экструдированных прутках сплава Mg-5Li-3Al диаметром 15 и 25 мм формируется практически одинаковая аксиальная призматическая текстура с преобладанием ориентировки $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ в осевом направлении (ОН) прутка.
3. В листах сплава Mg-9Li-1Al твердый раствор на основе Mg с ГПУ решеткой характеризуется свойственной текстуре прокатки магния базисной текстурой, а ОЦК твердый раствор на основе лития имеет текстуру $\{110\}$, которая соответствует не текстуре прокатки ОЦК металлов, а текстуре фазового превращения ГПУ \rightarrow ОЦК в соответствии с ориентационными соотношениями Бюргерса.
4. Обнаружена анизотропия пределов текучести и величины относительного удлинения, характеризуемая более высоким пределом текучести (на 10%) в поперечном прокатке направлении и более высокой пластичностью в направлении прокатки (на 43%).
5. С помощью рассчитанных из текстурных данных ориентационных факторов Закса показано, что анизотропия пределов текучести в листах

сплава Mg-9Li-1Al полностью определяется текстурой ГПУ фазы, характеризующейся большей интенсивностью призматических полюсов и соответственно большей прочностью в поперечном относительно прокатки направлении (ПН) по сравнению с направлением прокатки (НП).

6. Анализ изменения ориентации зерен при испытании на сжатие образцов с исходной призматической ориентацией сплавов систем Mg-Zn-Zr, Mg-Y-Nd-Zn-Zr и Mg-Li-Al позволил установить важные закономерности влияния легирующих элементов на механизм их пластической деформации.

7. Показано, что в сплаве системы Mg-Zn-Zr (МА14) также как в чистом магнии и сплавах Mg-Al-Zn (МА2-1, МА5) при сжатии в призматических направлениях действует легкое $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$ «растягивающее» двойникование, что обуславливает более низкую величину сопротивления деформации при сжатии по сравнению с растяжением, когда действуют системы с более высокими напряжениями сдвига.

8. В сплавах магния с иттрием (ВМД7-1) и литием деформация в призматических направлениях осуществляется с помощью призматического скольжения, при этом иттрий блокирует легкое «растягивающее» двойникование из-за эффекта упорядочения твердого раствора, а литий увеличивает предпочтительность призматического скольжения за счет относительного ослабления сил связи вдоль оси «а», что проявляется также в уменьшении осевого отношения «с/а».

9. Для сплавов с иттрием (ВМД7-1) характерна одинаковая или даже большая, чем при растяжении прочность при сжатии в долевым направлении, а для всех остальных сплавов (кроме сплавов с литием) прочность на сжатие в долевым направлении существенно ниже, чем при растяжении.

10. В отличие от аксиальной текстуры прутков в стенке трубы из сплава МА14 формируется базисная текстура аналогичная текстуре магниевых листов, что является следствием значительно большего обжатия по толщине трубы по сравнению с обжатием по диаметру.

11. Обнаружено, что текстура внутренней и внешней сторон трубы различаются, что является следствием несимметричной деформации по толщине стенки относительно ее среднего диаметра.

12. На основе критерия текучести Хилла развита процедура расчета контуров текучести для трубных заготовок из магниевых сплавов, позволяющая оценить напряжение течения при любом виде напряженного состояния на основании испытаний на растяжение долевым образцов и количественных текстурных данных.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ:

Список публикаций в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. С.Я. Бецофен, В.Ю. Конкевич, О.Е. Осинцев, И.А. Грушин, А.А. Петров, А.А. Авдюхина, И.И. Воскресенская Текстура и параметры анизотропии пресованных труб из сплава МА14, полученных методами гранульной металлургии//Физика и химия обработки материалов. 2017. № 6. С. 63-71
(Перевод) Betsofen, S.Y., Konkevich, V.Y., Osintsev, O.E., Grushin I.A., Petrov A.A., Avdyukhina, A.A., Voskresenskaya, I.I. Texture and Anisotropy Parameters of Pressed MA14 Alloy Pipes Produced by Granule Metallurgy Methods // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. т.9. №3. P. 551-557.
2. Бецофен С.Я., Осинцев О.Е., Грушин И.А., Петров А.А., Сперанский К.А. Влияние легирующих элементов на механизм деформации и текстуру магниевых сплавов// Деформация и разрушение материалов. 2018. № 8. С. 2–17.
(Перевод) S. Ya. Betsofen, O. E. Osintsev, I. A. Grushin, A. A. Petrov, and K. A. Speranskii Influence of Alloying Elements on the Deformation Mechanism and the Texture of Magnesium Alloys// Russian Metallurgy (Metally), 2019. No. 4. P. 346–360.
3. Бецофен С.Я., Осинцев О.Е., Грушин И.А., Петров А.А., Сперанский К.А. Закономерности формирования текстуры и анизотропии механических свойств магниевых сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 9. С. 2–15.
(Перевод) S. Ya. Betsofen, O. E. Osintsev, I. A. Grushin, A. A. Petrov, and K. A. Speranskii. Texture and Anisotropy of the Mechanical Properties of Magnesium Alloys// Russian Metallurgy (Metally)/ 2019. Vol. No. 4. P. 361–373.
4. С.Я. Бецофен, R. Wu, И.А. Грушин, А.А. Петров, К.А.Сперанский. Исследование механизма деформации, текстуры и анизотропии механических свойств сплавов МА14, ВМД7 и Mg-5Li-3Al. Деформация и разрушение материалов. 2020. №10. С.22-28.
5. S Ya Betsofen, I A Grushin, A A Petrov and K A Speransky. Texture and anisotropy of the mechanical properties of 2 mm sheets of Mg-9Li-3Al-0.4Ce alloy// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 889 (2020) 012004 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/889/1/012004

Список публикаций в других научных журналах и сборниках трудов:

1. Сперанский К.А., Грушин И.А., Петров А.А. Разработка экспериментальных и расчетных методов оценки параметров анизотропии текстурированных листовых полуфабрикатов из ГПУ-сплавов. Сборник докладов Международной молодежной научной конференции XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых) 2017 г., с. 352-357.
2. Петров А.А., Воскресенская И.И. Исследование влияния структурного состояния сплавов Mg - Al - Zn - Mn (МА2-1, МА5) и Mg - Zn - Zr (МА14) на коррозионную стойкость в 3% NaCl. Труды международной молодежной научной конференции «XLI Гагаринские чтения» в 4 томах М.: МАТИ. 2015. т.1. С. 20.
3. Петров А.А. Исследование текстуры и фазового состава сплавов Mg - 9Li - 1Al и Mg - 5Li - 3Al. Труды международной молодежной научной конференции «XLI Гагаринские чтения» в 4 томах М.: МАТИ. 2015. т.1. С. 59.