

МОСТЯЕВ ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ КОВКИ, ШТАМПОВКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И УРОВЕНЬ
СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ
ЖАРОПРОЧНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ ВМД16**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ))

Научный руководитель: **Волкова Екатерина Федоровна**
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Официальные оппоненты: **Бецофен Сергей Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 1101
«Технологии и системы автоматизированного проектирования
металлургических процессов» ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный исследовательский
университет)»
Лукьянова Елена Александровна
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории металловедения цветных и легких металлов
им. академика А.А. Бочвара ФГБУН «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова» (ИМЕТ РАН)

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Всероссийский институт легких сплавов» (ОАО «ВИЛС»)

Защита состоится «___» _____ 20___ г. в ___:___ на заседании диссертационного совета 31.1.002.01, созданного на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17; тел.: (499) 261-86-77, факс: (499) 267-86-09, e-mail: admin@viam.ru; www.viam.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Автореферат разослан «___» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук _____ Горбовец М.А.

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2024.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одним из ключевых требований при проектировании изделий авиационной техники является повышение весовой эффективности планера и систем, которого можно добиться за счет применения наиболее легких металлических конструкционных материалов – магниевых сплавов.

Деформируемые магниевые сплавы с высокими характеристиками прочности и пластичности применяются для деталей силового набора и системы управления современных летательных аппаратов, а также элементов конструкций, подвергающихся нагреву до 300 °С.

Основные механические, технологические, коррозионные характеристики, а также температурный порог воспламенения металлического материала напрямую зависят от структуры и фазового состава, которые, в свою очередь, зависят от химического состава сплава и технологических параметров изготовления конечного полуфабриката.

Деформированные полуфабрикаты из магниевых сплавов характеризуются существенной анизотропией механических свойств, которая представляет значительную опасность. Наибольшую опасность представляет анизотропия механических свойств массивных деталей большого сечения (в частности, поковок и штамповок), в связи с возможным наличием значительных поперечных напряжений.

Кроме того, существует проблема воспламеняемости этих материалов, являющаяся наиболее важной для принципиального решения вопроса практического применения магниевых сплавов в изделиях авиационной техники.

До 2016 года применение полуфабрикатов из магниевых сплавов для изготовления деталей в конструкции кресел, а также ответственных деталей управления было запрещено в соответствии с требованиями американского стандарта AS 8049 (FAR-25) п.3.2.4. по причине возможности их воспламенения в экстраординарных случаях при достижении определенного температурного порога.

Высокий температурный порог и сниженная опасность воспламенения магниевых сплавов расширяют возможности их применения в отраслях современной техники, позволяя более широко реализовать их преимущества.

Ранее в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ был разработан и запатентован жаропрочный деформируемый магниевый сплав марки ВМД16, легированный цинком, цирконием и РЗМ, относящийся к группе LPSO-фазосодержащих сплавов, предназначенный для деталей с температурой эксплуатации длительно до 200 °С, кратковременно до 300 °С, в виде прессованных полуфабрикатов. В большинстве случаев прессованные полуфабрикаты служат промежуточным продуктом для дальнейшего изготовления кованных и штампованных полуфабрикатов, из которых непосредственно изготавливают конструкционные элементы летательных аппаратов.

В связи с тем, что уровень основных служебных характеристик деформируемых магниевых сплавов определяется совокупностью факторов, таких, как особенности структуры, характер формирующегося фазового состава, технология изготовления, термическая обработка (ТО), возникает необходимость в установлении закономерностей влияния технологических параметров деформации и термической обработки на структуру, фазовый состав и свойства деформированных полуфабрикатов.

Таким образом, актуальной задачей является повышение прочностных характеристик и температуры воспламенения конструкционных элементов изделий авиационной техники за счет применения кованных и штампованных полуфабрикатов (в частности, для деталей пассажирских кресел) из деформируемого жаропрочного магниевого сплава ВМД16 системы Mg-Zn-Zr-PЗМ. Полуфабрикат должен обладать повышенными свойствами при растяжении и сжатии, что достигается путем оптимизации технологических параметров деформации и ТО, а его применение обеспечивать снижение массы детали до 20 % относительно алюминиевых сплавов.

Цель и задачи исследований

Исследование влияния технологических параметров деформации (ковки, штамповки) и термической обработки на структуру, фазовый состав и уровень основных механических свойств деформированных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава ВМД16.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование влияния технологических параметровковки и штамповки на структуру, фазовый состав и механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) деформированных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава ВМД16. Оценка влияния технологических параметровковки и штамповки на анизотропию механических свойств.

2. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) кованных и штампованных полуфабрикатов из жаропрочного деформируемого магниевого сплава ВМД16.

3. Выбор технологических параметровковки и штамповки и режима термической обработки, обеспечивающих высокие механические свойства.

4. Определение свойств (статических, динамических, коррозионных) и характеристик воспламеняемости (горючести) кованных и штампованных полуфабрикатов из деформируемого жаропрочного магниевого сплава ВМД16, изготовленных с учетом выбранных параметров деформации и режимов термической обработки.

Научная новизна работы

1. По результатам исследования тонкой структуры и фазового состава во всех рассмотренных состояниях для кованных и штампованных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 системы Mg-Zn-Zr-PЗМ, деформированных при температуре 350 – 420 °С, изучены морфология и топология LPSO - фаз, которые присутствуют в виде нанодисперсных слоев (толщина пластин в слое не более 1 - 3 нм), а также выявлено наличие блоков и фрагментов эвтектических фаз, являющихся основными интерметаллидными компонентами, упрочняющими структуру сплава.

2. Установлено, что для деформируемого магниевого сплава ВМД16 природной особенностью кованных и штампованных полуфабрикатов из этого сплава является специфический эффект старения, заключающийся в том, что при длительных выдержках (96 - 120 часов) при температуре 200 °С (как при проведении закалки, так и без нее) происходит переориентация текстурных компонентов и упрочняющих легирующих РЗМ и Zn между слоями нанодисперсных LPSO - фаз, что приводит к переориентации более высокого уровня прочностных свойств с продольного на поперечное направление волокна поковки.

3. Достигнут высокий порог воспламенения за счет присутствия интерметаллидных соединений, содержащих цинк, иттрий, лантан и неодим, а также благодаря образованию оксида иттрия Y_2O_3 на поверхности материала в процессе горения и оксидов легирующих элементов. Установлены температуры воспламенения ($T \geq 812$ °С) кованных и штампованных

полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16, превышающие порог воспламеняемости серийных деформируемых магниевых сплавов на $\geq 350^{\circ}\text{C}$.

Практическая значимость

1. На основании результатов исследований структурных изменений современными методами микроанализа и определения уровня основных механических свойств определены температурно-скоростные параметры деформации магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗМ при изготовлении штампованных и кованных полуфабрикатов, что обеспечило следующий уровень свойств (минимальные значения в продольном направлении):

- малогабаритные поковки $\sigma_{\text{в}} = 315 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 260 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 13 \%$;
- среднегабаритные поковки $\sigma_{\text{в}} = 320 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 245 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 11 \%$;
- штамповки $\sigma_{\text{в}} = 325 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 260 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 9,4 \%$.

2. Разработаны режимы термической обработки для получения кованных и штампованных полуфабрикатов с требуемыми характеристиками для применения в изделиях авиационной техники.

3. Разработаны технологии изготовления кованных и штампованных полуфабрикатов, проведена общая квалификация полуфабрикатов (паспортизация) и оформлен комплект НД:

- ТР 1.2.2349-2014 «Изготовление поковок из сплава ВМД16»;
- ТУ 1-804-546-2014 «Поковки из сплава марки ВМД16» литера О₁;
- Изменение № 1 к Технологической рекомендации ТР 1.2.2349-2014 «Изготовление поковок из сплава ВМД16»;
- Изменение № 1 к ТУ 1-804-546-2014 «Поковки из магниевого сплава ВМД16»;
- ТР 1.2.2907-2021 «Изготовление штамповок из жаропрочного магниевого сплава марки ВМД16»;
- ТУ 1-804-602-2021 «Штамповки из магниевого сплава марки ВМД16» литера «О»;
- Патент № 2598424 «Способ обработки магниевых сплавов»;
- Дополнения №1 и №2 к паспорту №1889 на жаропрочный магниевый сплав марки ВМД16.

4. Определены характеристики воспламеняемости (горючесть) кованных и штампованных полуфабрикатов из магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗМ, в соответствии с требованиями отечественных Авиационных Правил - АП25 и с учетом FAR (Federal Aviation Regulation, США). Установлены температуры воспламенения кованных и штампованных полуфабрикатов $T = 812 - 977^{\circ}\text{C}$.

5. Получено «Заключение о возможности применения детали в составе системы внешней подвески (подкос) из сплава ВМД16 в перспективных изделиях вертолетной техники» и «Заключение о возможности применения поковок из сплава ВМД16 в перспективных изделиях вертолетной техники» от АО «НЦВ Миля и Камова».

На защиту выносятся:

1. Установленные особенности влияния технологических параметров деформации (температура нагрева заготовок и инструмента) и схемы деформации на структуру и основные механические свойства (временное сопротивление при растяжении, предел текучести при растяжении и сжатии, относительное удлинение) кованных и штампованных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава ВМД16.

2. Установленные особенности влияния температурно-временных параметров деформации совместно с термической обработкой на структуру, фазовый состав и физико-механические характеристики (временное сопротивление при растяжении, предел текучести

при растяжении и сжатии, относительное удлинение) кованных и штампованных полуфабрикатов из жаропрочного магниевых сплава ВМД16.

3. Полученные результаты испытаний механических свойств кованных и штампованных полуфабрикатов из жаропрочного магниевых сплава ВМД16 после рекомендуемых режимов деформации и термической обработки.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в разработке технологии изготовления полуфабрикатов, отработке технологических режимов изготовления полуфабрикатов, проведении комплекса исследований образцов изготовленных полуфабрикатов, составлении нормативно-технической документации, подготовка публикаций и представлении результатов работы.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XIV Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» в рамках IX Международной недели авиакосмических технологий «Aerospace Science Week», Москва, 2022 г.

- Научно-техническая конференция «Металловедение и современные разработки в области технологий, литья, деформации и термической обработки легких сплавов», посвященная 120-летию со дня рождения профессора, д.т.н. И.Ф. Колобнева, Москва, 2016 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников и двух приложений. Содержит 153 страницы машинописного текста, в том числе 68 рисунков и 28 таблиц. Библиографический список включает 157 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация работы.

В первой главе на основе литературного обзора научных публикаций отображены теоретические предпосылки к разработке режимов, схем деформации и термической обработки деформированных магниевых сплавов системы Mg-Zn-Zr-PЗМ, описаны основные механизмы деформации, технологические особенностиковки, штамповки и последующей термической обработки, влияющие на уровень механических характеристик. Рассмотрены основные проблемы, возникающие в процессе применения магниевых сплавов ввиду их склонности к воспламенению при повышенных температурах. На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе приведено описание объектов и методов исследований. В качестве объектов исследований использовали кованные и штампованные полуфабрикаты из жаропрочного магниевых сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗМ, марки ВМД16, содержащего иттрий, лантан и неодим. Исходными заготовками служили прессованные полуфабрикаты, изготовленные в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ и ПАО «КУМЗ».

В работе применяли методы металлографических и термических исследований образцов полуфабрикатов, методики определения их прочностных, пластических (при растяжении и сжатии), жаропрочных и коррозионных характеристик.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния технологических параметров деформации и последующей термообработки на структуру, фазовый состав и уровень свойств кованных и штампованных полуфабрикатов из сплава ВМД16.

В работе для выбора технологических параметров изготовления экспериментальных поковок определяли характеристики при растяжении и сжатии в интервале температур от 350 до 475 °С. По результатам испытаний была построена диаграмма технологической пластичности (Рисунок 1).

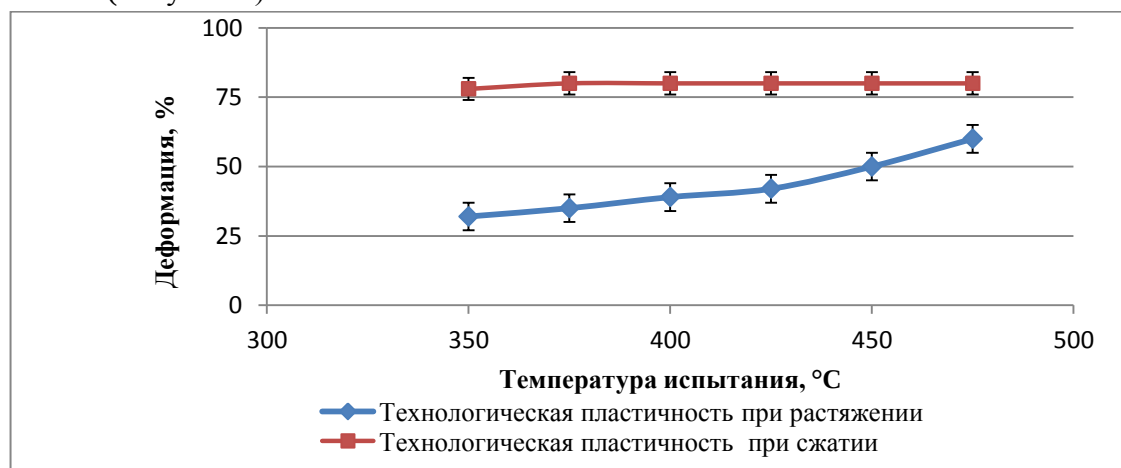


Рисунок 1 – Диаграмма технологической пластичности сплава ВМД16 в горячепрессованном состоянии при растяжении и при сжатии

По результатам анализа технологической пластичности выбран режим деформации промежуточных прессованных заготовок из сплава ВМД16: температура нагрева в интервале (от 350 до 475) °С, допустимая степень деформации при сжатии – 75 – 80 %. Этот режим должен обеспечивать наиболее высокие значения пластичности при растяжении ($\delta = 35 - 60 \%$) и сжатии ($\epsilon_B \sim 80 \%$).

На основании полученных результатов были установлены температурно-временные параметры изготовления экспериментальных поковок массой 0,2 кг из сплава ВМД16. Ковка заготовок массой 0,2 кг (Рисунок 2) проходила в три стадии: осадка с 70 мм до 35 мм, кантовка и осадка по образующей до 35 мм, подбивка граней и осадка до 15 мм. Процесс многопереходнойковки был выполнен за один нагрев заготовок, со скоростью деформации ~ 2 мм/с. Температура нагрева заготовок варьировалась от 370 °С до 440 °С, инструмент был прогрет до 330 - 340 °С.



Рисунок 2 – Внешний вид опытной поковки массой 0,2 кг

Исследование критических температур методом дифференциального термического анализа (ДТА) показало, что имеют место два фазовых превращения с эндотермическим

эффектом при температурах: 442 °С, 527 °С. Температуры фазовых превращений выше температуры нагрева под деформацию, что свидетельствует об имеющемся у сплава потенциале термостабильности.

Микроструктура исследованных образцов после проведенияковки характеризуется несколько удлинёнными в продольном направлении зёрнами α -твёрдого раствора на основе магния, легированного иттрием, и содержит фрагменты эвтектики обогащенные неодимом (белые частицы на фотографиях), частицы фаз $Mg_{12}Nd$, $Mg_{12}La$ и $Mg_{12}ZnY$, (Рисунок 3).

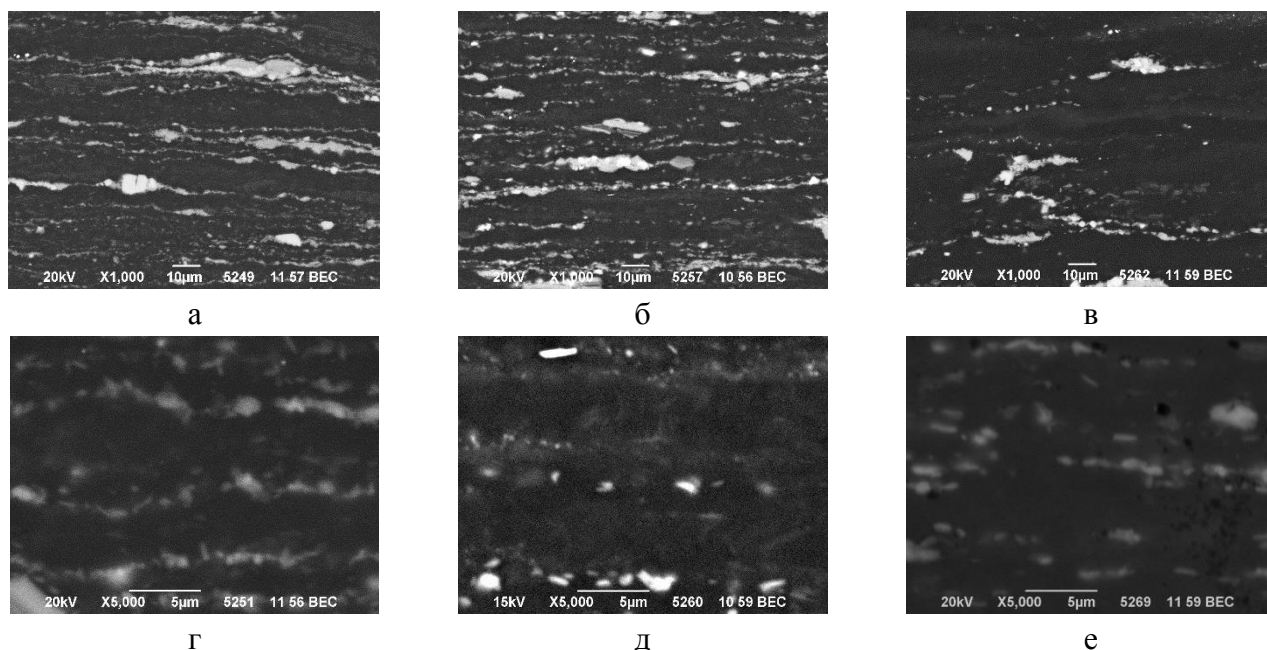


Рисунок 3 – Микроструктура опытной поковки (продольное направление): а, б, в – общий вид, х1000; г, д, е – эвтектика по границам зерен х5000; а, г – температураковки 370°С, б, д – температураковки 420°С; в, е – температураковки 440°С. РЭМ

Структура материала образцов из поволоков, прошедших деформацию при 370 °С, представлена разориентированными зёрнами размером от 1 до 2 мкм (встречаются отдельные зёрна 0,5 мкм) (Рисунок 4 а). В самом объёме зерна отмечена высокая плотность дислокаций. В объёме зерна и по границам сформированы частицы цирконидов цинка, а также частицы, содержащие лантан и неодим. Также наблюдаются области эвтектики, обогащенной цинком и иттрием (Рисунок 3 г).

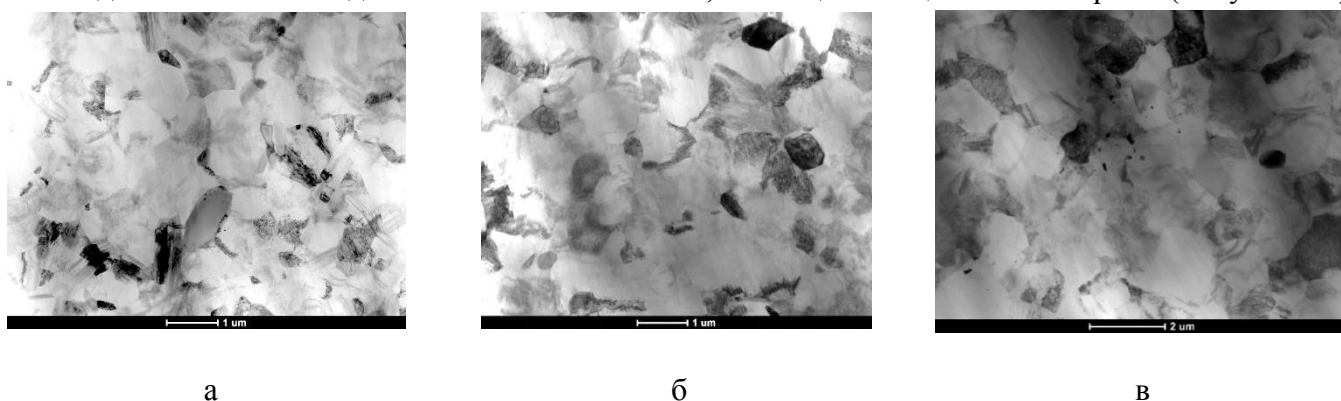


Рисунок 4 – Зёрненная структура поволоков из сплава ВМД16, изготовленных при температурах: а – 370 °С; б – 420 °С; в – 440 °С. ПЭМ

В объёме всех зёрен присутствуют пластины длиннопериодной фазы (LPSO-фазы), богатой цинком и иттрием. Пластины LPSO-фазы преимущественно одно- и двухслойные, но присутствуют и многослойные (Рисунок 5 а). В местах образования субграниц наблюдается

разворот пластин LPSO-фазы, а в некоторых местах и сдвиг. Присутствуют зёрна, в которых исходные LPSO-фазы претерпевают разворот несколько раз. При этом ориентационные соотношения с кристаллической решёткой твердого раствора остаются неизменными. Содержание Y и Zn в однослойных пластинах LPSO-фазы составляют 2,5 и 1,5 ат. %, соответственно.

Структура материала поковок, продеформированных при 420 °С, подобна структуре поковок после деформации при 370 °С. Отличие состоит в размере зерна. После деформации при 420 °С размер зерна располагается в диапазоне от 1 до 3 мкм (Рисунок 4 б).

Структура материала после деформации при 440 °С имеет схожее строение с остальными образцами. Однако средний размер зерна несколько увеличивается и составляет не менее 2,0 – 2,5 мкм (Рисунок 4 в).

В объёме зерен также присутствуют пластины LPSO-фазы. Однако наблюдается значительное увеличение коротких однослойных пластин LPSO-фазы по сравнению с состоянием после деформации при 420 °С. Содержание Y и Zn в пластинах LPSO-фазы 2,0 и 1,5 ат. %, соответственно (результаты по трёхслойной пластине).

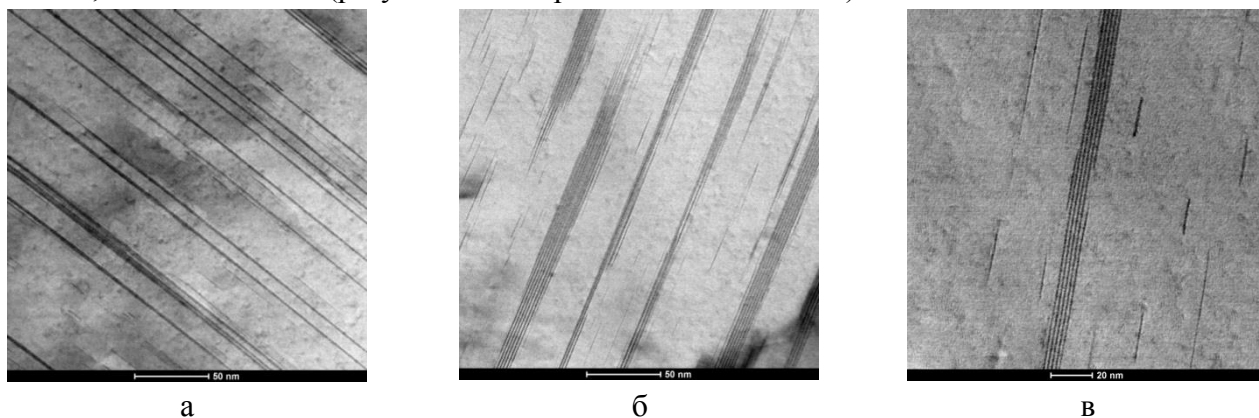


Рисунок 5 – Структура материала поковок после деформации:
а – при 370 °С; б – при 420 °С ;в – 440 °С. ПЭМ

Для поковок, изготовленных при 420 °С и 440 °С, наблюдается изменение морфологии LPSO-фазы. Происходит частичное растворение широких пластин и образование коротких однослойных в объёме зерна (Рисунок 5 б, в). Содержание Y и Zn в широких пластинах LPSO-фазы повышается до 6,0 и 4,0 ат. %, соответственно.

Таким образом, основные структурные изменения в материале, подвергнутом деформации в интервале температур 370 – 440 °С, происходят на наноуровне и могут быть обнаружены только при исследовании на просвечивающем электронном микроскопе с высоким разрешением.

Механические свойства при растяжении и сжатии опытных поковок из сплава ВМД16 приведены в таблице 1.

Анализ результатов свидетельствует о высоком уровне механических свойств опытных поковок во всех исследованных направлениях при растяжении и сжатии. Повышение температуры нагрева заготовок и нагрева инструмента на 20 – 25 °С приводит к некоторому (на 5 – 10 %) снижению прочностных характеристик.

Таблица 1 – Механические свойства при растяжении образцов из опытных кованных поковок массой 0,2 кг из сплава ВМД16 при различных температурах деформации

Температура деформации поковки, °С	Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma^c_{0,2}$, МПа
370	Д	<u>355-360</u> 357	<u>345-345</u> 338	<u>14,0-18,0</u> 16,8	<u>325-370</u> 350
	П	<u>350-360</u> 355	<u>345-345</u> 340	<u>7,4 – 13,0</u> 10,0	<u>340-360</u> 350
420	Д	<u>335-340</u> 337	<u>310-320</u> 313	<u>17,5 - 18,5</u> 18,2	<u>310-325</u> 315
	П	<u>315-315</u> 315	<u>285-285</u> 285	<u>16,0-16,5</u> 16,2	<u>290-300</u> 295
440	Д	<u>325-330</u> 328	<u>295-300</u> 297	<u>16,5-17,5</u> 16,5	<u>295-300</u> 300
	П	<u>320-320</u> 320	<u>280-280</u> 280	<u>20,0-23,5</u> 21,5	<u>285-295</u> 290

На основании проведенных экспериментов и исследований были выполнены работы по разработке технологий изготовления малогабаритных (массой 10 кг) и среднегабаритных (массой 22 кг) поковок из сплава ВМД16 в промышленных условиях ПАО «КУМЗ» (Рисунок 6).



а



б

Рисунок 6 – Внешний вид поковок из сплава ВМД16: а – поковка массой 10 кг; б – поковка массой 22 кг

Исходными заготовками послужили промежуточные прессованные мерные заготовки. Для изготовления малогабаритных поковок использовали мерные заготовки размерами $\varnothing 161 \times 260$ мм, а для среднегабаритных – размерами $\varnothing 190 \times 400$ мм, вырезанные из прутков сплава ВМД16 производства ПАО «КУМЗ».

При разработке технологий применяли схемы деформации с осадкой с последующей вытяжкой с различным количеством кантовок. Это обусловлено сложным химическим составом сплава. Изготовление малогабаритных поковок проводили по двум выбранным схемам, а изготовление среднегабаритных поковок проводили по схеме с большим количеством кантовок. Данный выбор объясняется увеличенными габаритами поковки и необходимостью получения наиболее однородной структуры по всему сечению поковки.

Дополнительно варьировали количество переходов, температуру нагрева промежуточных заготовок, температуру нагрева бойков перед началомковки и по ее окончании.

Обычная схема ковки в данной работе включает следующие операции: осадка в торец → ковка на квадрат → ковка вдоль оси слитка → подбивка граней. Усиленная схема включает еще несколько дополнительных операций по осаживанию и последующей ковке деформируемой заготовки.

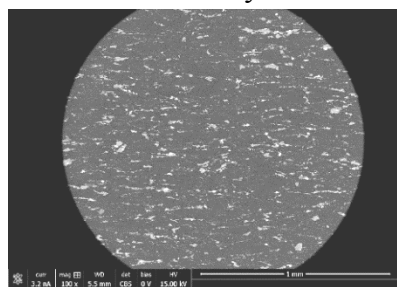
Технологические параметры ковки этих полуфабрикатов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические параметры изготовления малогабаритных и среднегабаритных поковок массой 10 и 22 кг из сплава ВМД16.

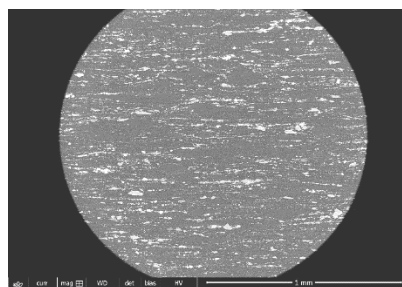
Поковка	Схема ковки	Температура заготовки, °С	Температура окончания ковки, °С	Температура нагрева инструмента, °С	Скорость деформации, мм/с.
10 кг	Усиленная	370	360	345 - 365	2,0
	Обычная	370 - 375	355 - 385		0,7
22 кг	Усиленная	370 - 430	355 - 375	350 - 375	0,7 – 2,0

Микроструктура исследованных образцов из поковок сплава ВМД16 представляет собой вытянутые в продольном направлении зерна α -твердого раствора, легированного иттрием и цинком; содержит фрагменты эвтектической фазы и частиц различных интерметаллидных фаз, содержащих цирконий, магний, неодим и лантан. В целом, структура исследуемых малогабаритных поковок аналогична структуре экспериментальных поковок.

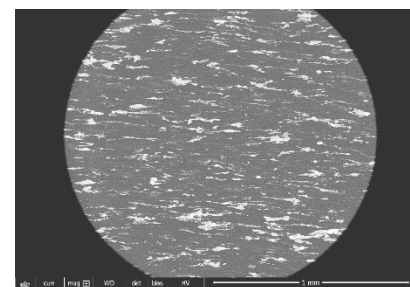
В образцах, изготовленных по усиленной схеме ковки (Рисунок 7 а) и по обычной схеме ковки со сниженной скоростью деформации (Рисунок 7 в), структура более однородная, по сравнению с образцом, изготовленным по обычной схеме (Рисунок 7 б), в которой присутствуют зерна различного размера. В образце из поковки, изготовленной по обычной схеме со сниженной скоростью ковки (0,7 мм/с), зерна имеют меньший размер, чем в образце, изготовленном по усиленной схеме.



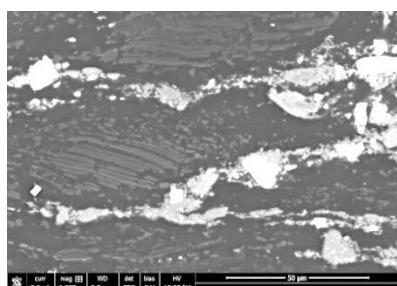
а



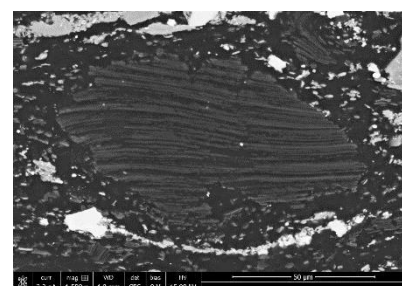
б



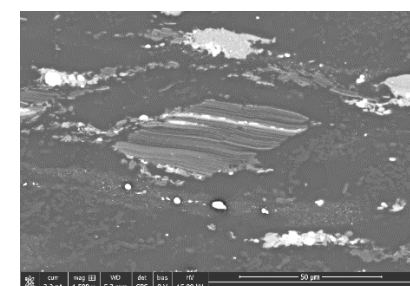
в



г



д



е

Рисунок 7 – Микроструктура малогабаритной поковки из сплава ВМД16 (продольное напр.): а - в – общий вид, маркер 1 мм; г - е – зерна твердого раствора и эвтектика по границам зерен; а, г – поковка (усиленная схема); б, д – поковка (обычная схема); в, е – поковка (обычная схема со сниженной скоростью). РЭМ

Механические свойства при растяжении и сжатии малогабаритных поковок массой 10 кг из сплава ВМД16 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний механических свойств малогабаритных поковок, изготовленных по двум схемамковки

Схемаковки	Направление вырезки образца	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma^c_{0,2}$, МПа
Обычная	Продольное	$\frac{300-305}{305}$	250	12,0	$\frac{240-245}{240}$
	Поперечное	$\frac{300-305}{300}$	250	$\frac{8,0-13,5}{10,5}$	$\frac{240-245}{240}$
Усиленная	Продольное	$\frac{315-320}{315}$	$\frac{260-265}{260}$	13,0	270
	Поперечное	$\frac{280-300}{290}$	$\frac{250-255}{250}$	$\frac{5,6-7,8}{6,5}$	$\frac{255-265}{260}$

Анализ результатов испытаний механических свойств показал, что применение обычной схемыковки позволило добиться отсутствия анизотропии по пределу прочности и текучести. Применение усиленной схемыковки приводит к повышению прочностных характеристик в продольном направлении при некотором их снижении в поперечном.

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал наличие послойной текстурной неоднородности в высотном направлении малогабаритной поковки, при которой в приповерхностных слоях усилена базисная компонента текстуры, что позволяет сделать вывод о неравномерности уровня механических характеристик поковки по сечению, что необходимо учитывать при изготовлении детали из этого полуфабриката (Рисунок 8).

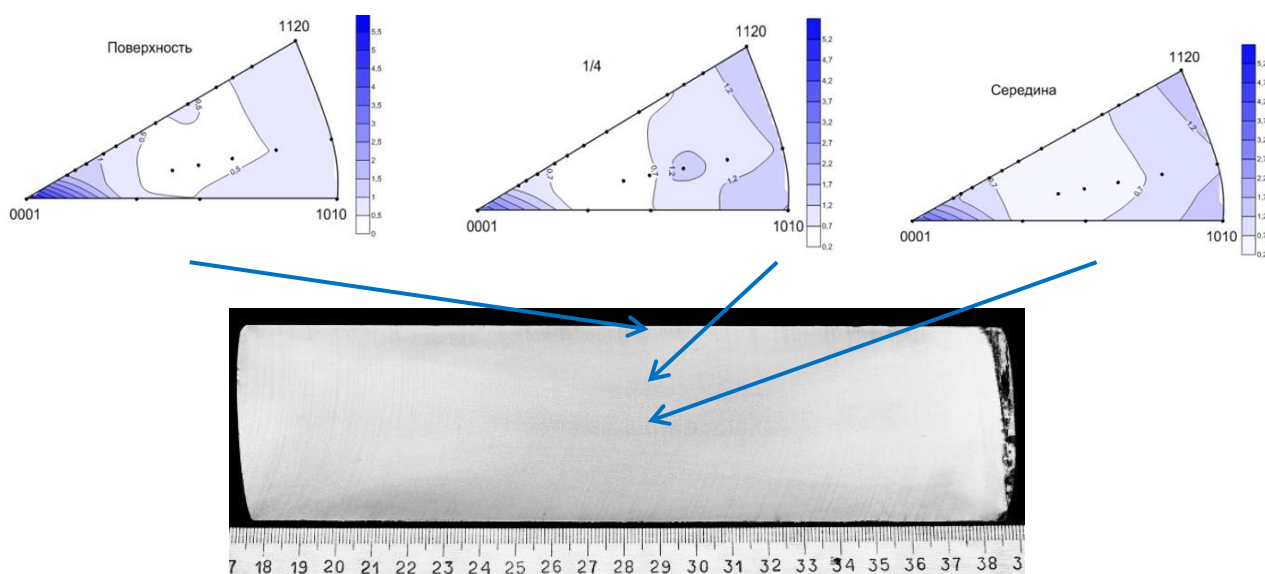


Рисунок 8 – Обратные полюсные фигуры (ОПФ) и макроструктура поперечного сечения малогабаритной поковки

Результаты исследования микроструктуры среднегабаритной поковки показали наличие вытянутых в продольном направлении зерен твердого раствора, строчек фрагментов эвтектической интерметаллидной фазы, содержащей иттрий и цинк (Рисунок 9, 10). По границам зерен расположены также фрагменты упрочняющей эвтектической фазы, содержащей магний, иттрий и цинк ((Mg,Zn)₅Y) (Рисунок 9 в). По границам и внутри эвтектической фазы наблюдаются скопления микрочастиц интерметаллидных фаз, содержащих иттрий, кадмий, цирконий, а также в ряде случаев – неодим и лантан (Рисунок 10 в, г).

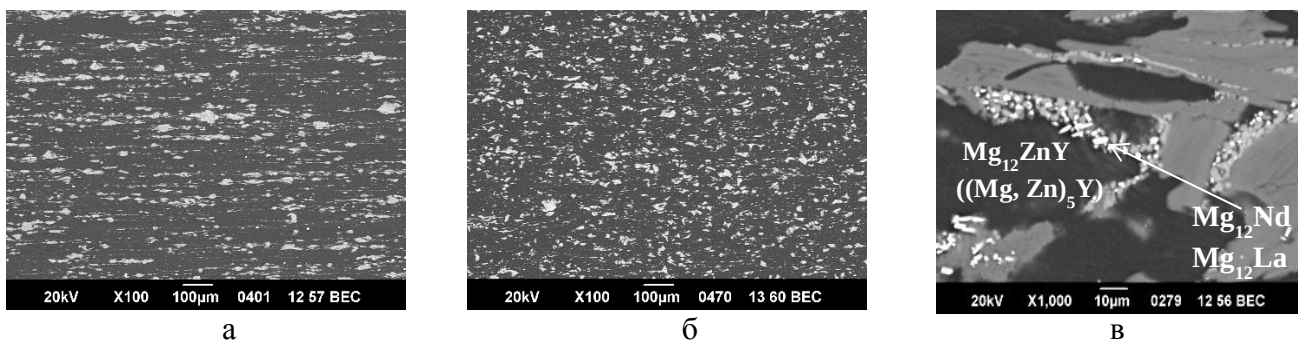


Рисунок 9 - Микроструктура среднегабаритной поковки сплава ВМД16: а - продольное направление; б - поперечное направление, маркер 100 мкм., в - эвтектическая интерметаллидная фаза, содержащая Y и Zn и светлые вкрапления дисперсных частиц интерметаллидных фаз с элементами Nd, La, маркер 10 мкм. РЭМ

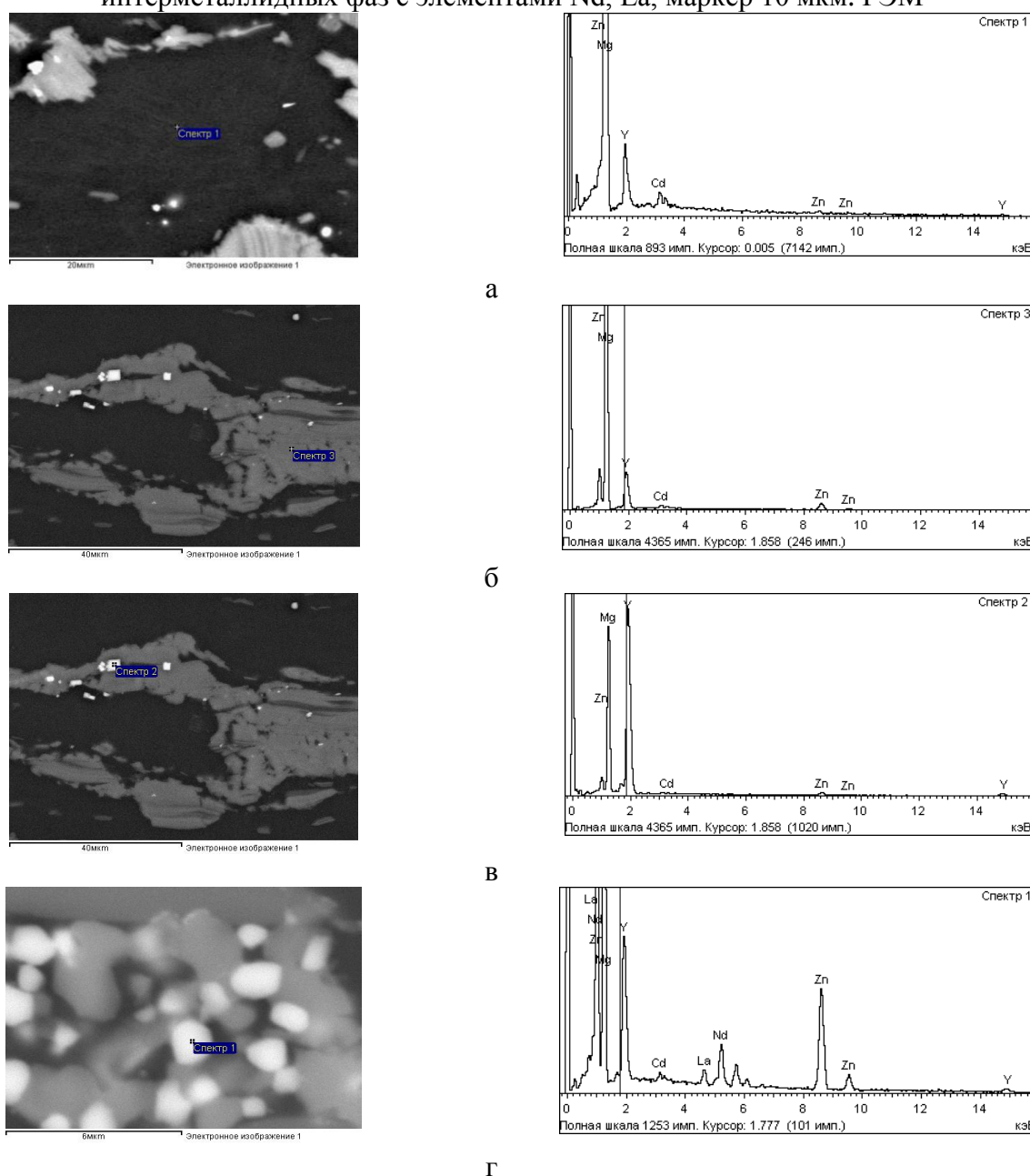


Рисунок 10 – Данные микрорентгеноспектрального анализа поволоков сплава ВМД16: а – матрица образца, маркер 20 мкм; б – эвтектическая интерметаллидная фаза, маркер 40 мкм; в – частицы интерметаллидных фаз, содержащие иттрий, цинк, маркер 40 мкм; г – дисперсные частицы фаз на основе редкоземельных металлов, маркер 6 мкм

Повышенные характеристики прочности исследуемой поковки в значительной мере объясняются тем, что границы зерен заблокированы частицами фрагментов устойчивой эвтектики, дополнительно упрочненной дисперсными включениями, а α -твердый раствор как сеткой укреплен частицами цирконидов цинка. Рассмотренная структура сплава при повышенных температурах способна сохранять стабильность.

Механические свойства при растяжении и сжатии среднегабаритных поковок массой 22 кг из сплава ВМД16 представлены в таблице 4.

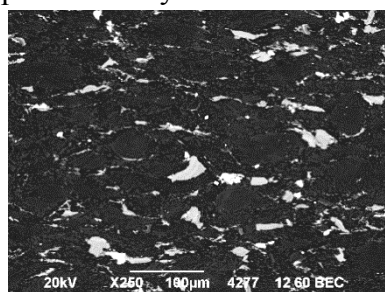
Таблица 4 – Механические свойства при растяжении и сжатии среднегабаритных поковок из сплава ВМД16 при температуре +20 °С

Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma^c_{0,2}$, МПа
Продольное	<u>320-325</u> 320	<u>245 -245</u> 245	<u>11,0-14,0</u> 12,5	<u>250-260</u> 255
Поперечное (по ширине)	<u>280-295</u> 290	<u>220-230</u> 225	<u>10,0-13,0</u> 11,6	<u>235-245</u> 240

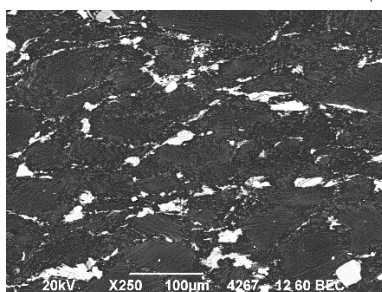
Анализ полученных результатов показал, что коэффициент анизотропии по временному сопротивлению составляет ~ 12 %, по пределу текучести при растяжении составляет ~ 8 %, по пределу текучести при сжатии не превышает ~ 6%, по относительному удлинению составляет ~ 7 %.

При разработке режимов термической обработки кованных полуфабрикатов проведены исследования влияния отжига, старения и закалки со старением на структуру и механические свойства поковок.

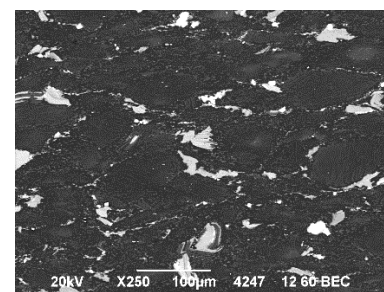
Для исследований влияния отжига выбран температурный интервал 300 – 450 °С с шагом 50 °С при выдержке 0,5 ч. Анализ структуры методом РЭМ (Рисунок 11) показал, что с увеличением температуры нагрева происходит увеличение размера зерен твердого раствора, при этом визуально объемная доля эвтектических составляющих практически не меняется.



а



б



в

Рисунок 11 – Микроструктура малогабаритной поковки сплава ВМД16 после отжига: а – 300 °С, выдержка 0,5 ч; б – 350 °С, выдержка 0,5 ч; в – 300 °С, выдержка 0,5 ч., маркер 100 мкм. РЭМ

Отжиг инициирует активное развитие процессов рекристаллизации. Формируется рекристаллизованная структура с равномерными включениями упрочняющих высокодисперсных фаз, которые могут располагаться как по границе, так и в теле зерна.

Механические характеристики поковок после отжига по различным режимам приведены в таблицах 5, 6.

При выдержке в течение 30 минут при проведении отжига процессы рекристаллизации еще не получают существенного развития, что создает условия для достижения благоприятного соотношения прочностных и пластических свойств за счет формирования на первом этапе рекристаллизации достаточно мелкозернистой структуры.

Имеет место значительное снижение анизотропии основных механических свойств в продольном и поперечном направлениях поковок обоих видов после проведения отжига по режимам: 350 - 450 °С, выдержка 0,5 ч. Это связано с протеканием процессов рекристаллизации.

Заметное разупрочнение имеет место при температурах отжига свыше 400°С.

Таблица 5 – Механические свойства малогабаритных поковок, после отжига по различным режимам

Режим термической обработки	Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma_{0,2}^c$, МПа
300 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>315-320</u> 315	<u>255-265</u> 255	<u>12,0-15,0</u> 14,5	<u>265-270</u> 270
	П	<u>285-300</u> 295	<u>240-250</u> 250	<u>6,6-10,5</u> 8,3	<u>255-260</u> 255
350 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>310-315</u> 315	<u>250-265</u> 260	<u>15,5-19,5</u> 17,5	<u>260-270</u> 270
	П	<u>275-295</u> 285	<u>245-250</u> 250	<u>10,5-16,8</u> 12,4	<u>255-265</u> 260
400 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>305-315</u> 310	<u>255-275</u> 265	<u>16,0-20,0</u> 19	<u>260-275</u> 270
	П	<u>270-290</u> 280	<u>245-270</u> 255	<u>12,0-15,0</u> 13,0	<u>260-275</u> 270
450 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>270-300</u> 285	<u>230-255</u> 245	<u>20,0-22,0</u> 21,1	<u>255-270</u> 270
	П	<u>255-275</u> 270	<u>235-250</u> 245	<u>14,0-17,5</u> 15,5	<u>245-260</u> 255

Таблица 6 – Механические свойства среднегабаритных поковок, после отжига по различным режимам.

Режим термической обработки	Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma_{0,2}^c$, МПа
300 °С, выдержка 0,5 ч	Д	310	260	<u>11,2-13,5</u> 12,1	<u>265-270</u> 270
	П	<u>285-295</u> 290	<u>235-245</u> 240	<u>9,0-12,0</u> 10,6	<u>250-255</u> 255
350 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>305-310</u> 305	<u>260-265</u> 260	<u>12,2-13,0</u> 12,6	<u>265-270</u> 270
	П	<u>285-290</u> 285	<u>250-255</u> 250	<u>11,7-12,3</u> 11,0	<u>255-250</u> 260
400 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>300-305</u> 300	<u>260-270</u> 265	<u>13,0-14,8</u> 13,5	<u>260-270</u> 270
	П	<u>280-285</u> 280	<u>255-265</u> 260	<u>12,2-13,5</u> 13,2	<u>255-270</u> 265
450 °С, выдержка 0,5 ч	Д	<u>285-300</u> 290	<u>250-260</u> 255	<u>15,3-17,1</u> 13,5	<u>260-265</u> 260
	П	<u>270-280</u> 270	<u>235-250</u> 245	<u>13,4-15,4</u> 14,2	<u>250-265</u> 260

Превышение температуры отжига свыше 400 °С приводит к дальнейшей интенсификации процессов рекристаллизации, в силу чего активно начинает протекать

собираетельная рекристаллизация, что позволяет прогнозировать появление разнотерности, увеличение среднего размера зерен в структуре и естественного снижения значений прочности и текучести (на 30 - 40 МПа).

Для исследования влияния старения (Т1) на структуру и механические свойства поковок были выбраны режимы нагрева 200 °С с длительной выдержкой (24, 48, 96 ч), в связи с тем, что магниевые-иттриевые сплавы отличаются спецификой протекания процессов старения. Максимальный уровень прочностных свойств при старении рассматриваемых магниевых сплавов может быть достигнут только после длительного времени выдержки в силу заторможенности диффузионных процессов.

В микроструктуре малогабаритных и среднегабаритных поковок после старения можно отметить большую плотность дисперсных выделений интерметаллидных упрочняющих фаз по сравнению с образцами после отжига, а также то, что с увеличением времени выдержки происходит увеличение плотности дисперсных выделений.

Микроструктура среднегабаритных поковок практически не меняется с увеличением времени выдержки при температуре 200 °С, но имеет некоторые отличия. Визуальный анализ особенностей представленной структуры показывает, что с увеличением времени выдержки происходит увеличение плотности дисперсных выделений. Это вызвано более интенсивным развитием диффузионных процессов и соответствующими структурными изменениями, что может быть объяснено более высокой температурой деформации этих поковок, превышающей температуру деформации малогабаритных поковок на 30-40 °С. Кроме того, имеет место масштабный фактор – из-за большей массы скорость охлаждения среднегабаритных поковок несколько ниже по сравнению с малогабаритными поковками.

Механические характеристики поковок после старения по различным режимам представлены в таблицах 7, 8.

Таблица 7 – Механические свойства малогабаритных поковок сплава ВМД16

Режим термической обработки	Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
-	Д	$\frac{315-320}{315}$	$\frac{260-265}{260}$	13,0
	П	$\frac{280-300}{290}$	$\frac{250-255}{250}$	$\frac{5,6-7,8}{6,5}$
200 °С, выдержка 24 ч	Д	$\frac{320-325}{325}$	$\frac{265-275}{275}$	$\frac{13,0-14,5}{14,5}$
	П	$\frac{280-305}{295}$	$\frac{255-260}{255}$	$\frac{5,8-8,5}{7,6}$
200 °С, выдержка 48 ч	Д	$\frac{325-330}{330}$	275	$\frac{13,5-16,5}{15,5}$
	П	$\frac{305-315}{310}$	$\frac{255-260}{255}$	$\frac{4,9-8,8}{6,9}$
200 °С, выдержка 96 ч	Д	$\frac{330-335}{335}$	$\frac{275-285}{280}$	$\frac{15,0-17,5}{16,5}$
	П	$\frac{330-345}{345}$	$\frac{250-260}{250}$	$\frac{2,2-5,0}{3,6}$

Старение сплава приводит к определенному повышению его прочностных характеристик при растяжении. После старения по режиму 200 °С - 96 часов временное сопротивление в

продольном направлении возрастает с 315 МПа до 335 МПа; предел текучести с 260 до 280 МПа.

Увеличение времени выдержки при старении приводит к заметному повышению прочностных свойств в поперечном направлении с одновременным снижением характеристики пластичности.

Максимальный эффект старения наблюдается для поперечного направления в процессе длительной выдержки (96 ч) при старении 200 °С.

Вероятнее всего, это явление может быть связано с перераспределением упрочняющих легирующих компонентов Y и Zr между слоями нанодисперсной фазы LPSO, поскольку фазовый состав сплава, исследованный методом растровой электронной микроскопии, сохраняется при всех изученных режимах старения.

Таблица 8 - Механические свойства среднегабаритных поковок сплава ВМД16

Режим термической обработки	Направление	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
-	Д	$\frac{320-325}{320}$	$\frac{245-245}{245}$	$\frac{11,0-14,0}{12,5}$
	П	$\frac{280-295}{290}$	$\frac{220-230}{225}$	$\frac{10,0-13,0}{11,6}$
200 °С, выдержка 24 ч	Д	$\frac{310}{310}$	$\frac{250-255}{250}$	$\frac{12,2 - 13,8}{13,0}$
	П	$\frac{280-300}{295}$	$\frac{250-255}{250}$	$\frac{9,3 - 11,1}{10,2}$
200 °С, выдержка 48 ч	Д	$\frac{315-320}{315}$	$\frac{250-265}{260}$	$\frac{14,4 - 16,0}{15,0}$
	П	$\frac{305-310}{305}$	$\frac{240-260}{250}$	$\frac{6,6 - 9,2}{8,5}$
200 °С, выдержка 96 ч	Д	$\frac{320-325}{320}$	$\frac{270-275}{270}$	$\frac{11,4 - 18,1}{15,5}$
	П	$\frac{320-335}{330}$	$\frac{225-235}{230}$	$\frac{3,0 - 4,5}{3,5}$

Проведены исследования влияния закалки со старением на структуру и механические свойства среднегабаритных поковок. Основываясь на результатах ДТА поковок была выбрана температура нагрева под закалку, равная 520 °С. Исследования проводили на режимах закалка при 520 °С с выдержкой 10 ч, охлаждение в воду 80 °С, старение 200 °С с выдержкой 96-120 ч.

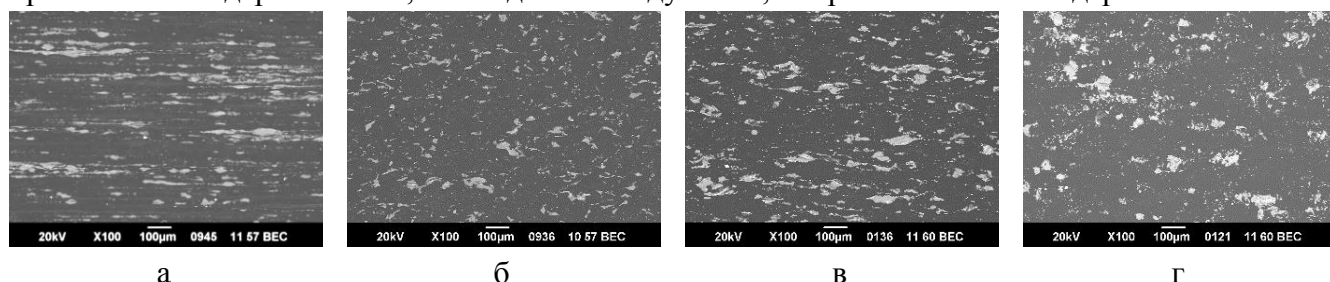


Рисунок 12 – Микроструктура термообработанных среднегабаритных поковок после ТО по режиму 520 °С, выдержка 10 ч, охлаждение в воду 80 °С, 200°С: а, б – выдержка 96 ч.; в, г – выдержка 120 ч; а, в – продольное направление; б, г – поперечное направление. РЭМ

Исследование структуры образцов после закалки и старения методом растровой электронной микроскопии (Рисунок 12) показало, что после закалки со старением с выдержкой 120 ч, частицы эвтектики подвергнуты более интенсивному растворению чем при закалке со старением с выдержкой 96 ч, что является предпосылками к снижению прочностных свойств в продольном направлении. С увеличением времени выдержки с 96 до 120 ч происходит более активное выделение упрочняющих фаз.

Исследование методом электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) подтвердило, что после термической обработки происходит частичное выделение интерметаллидных фаз. Поковка в нетермообработанном состоянии содержит следующие фазы:

- фрагменты эвтектической фазы (интерметаллидная фаза на основе магния, цинка, иттрия) имеют в среднем размер не более 100 мкм, вытянуты в направлении деформации, образуя строчки;
- интерметаллидная фаза на основе магния и лантана; частицы фазы размером не более 10 мкм располагаются преимущественно на поверхности эвтектической фазы;
- фаза на основе иттрия; частицы фазы размером не более 10 мкм имеют форму неправильных четырёхугольников и расположены преимущественно на поверхности эвтектической фазы;
- дисперсные гидриды на основе циркония, содержащие примеси железа, марганца, хрома; имеющие глобулярную форму и расположенные по всему объёму материала.

Построены ОПФ поковок в исходном состоянии и после закалки со старением, приведены на рисунке 13.

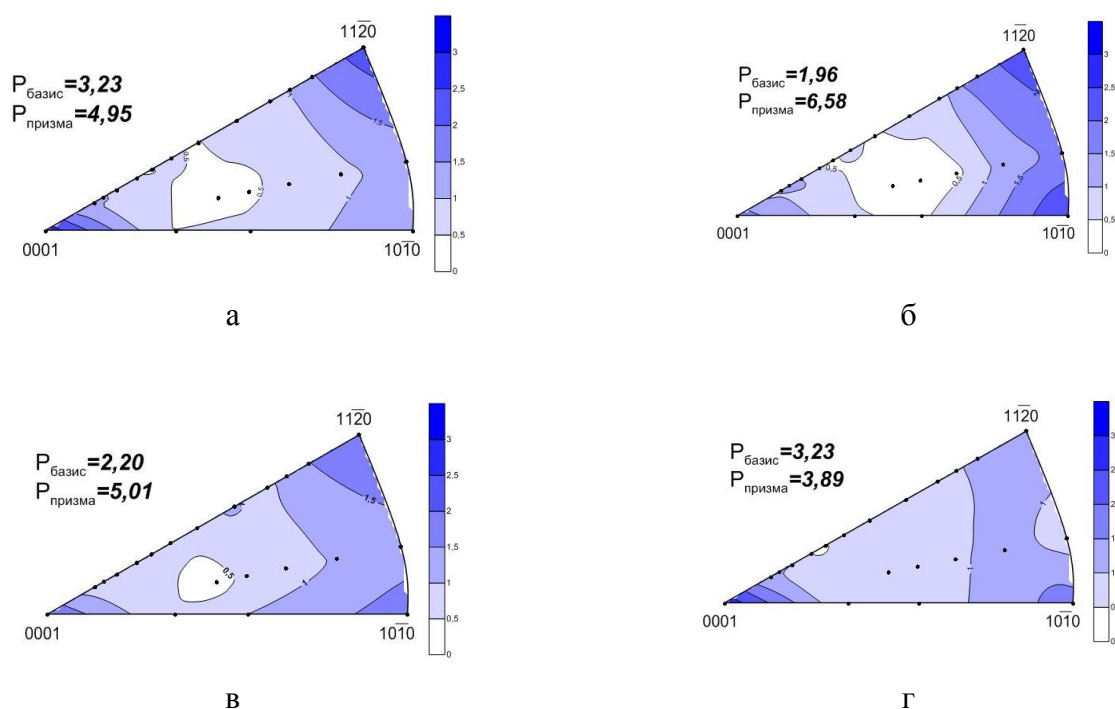


Рисунок 13 – ОПФ среднегабаритной поковки: а, б – продольное направление, в, г – поперечное направление; а, в – исходное состояние, б, г – после ТО (закалка со старением –Т6).

Установлено наличие текстурной анизотропии, а также то, что высокий предел текучести характеризуется призматической текстурой, а временное сопротивление – базисной текстурой.

Проведение термической обработки (закалка со старением) приводит к изменению характера анизотропии. В продольном направлении увеличивается призматическая текстура, а в поперечном направлении усиливается базисная текстура относительно исходного состояния.

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе термической обработки, состоящей из закалки и длительного старения, происходит перераспределение текстурных компонентов.

Результатом такой переориентации должно являться повышение уровня прочностных свойств в поперечном направлении и снижение в продольном направлении поковок.

Механические характеристики поковок представлены в таблице 9.

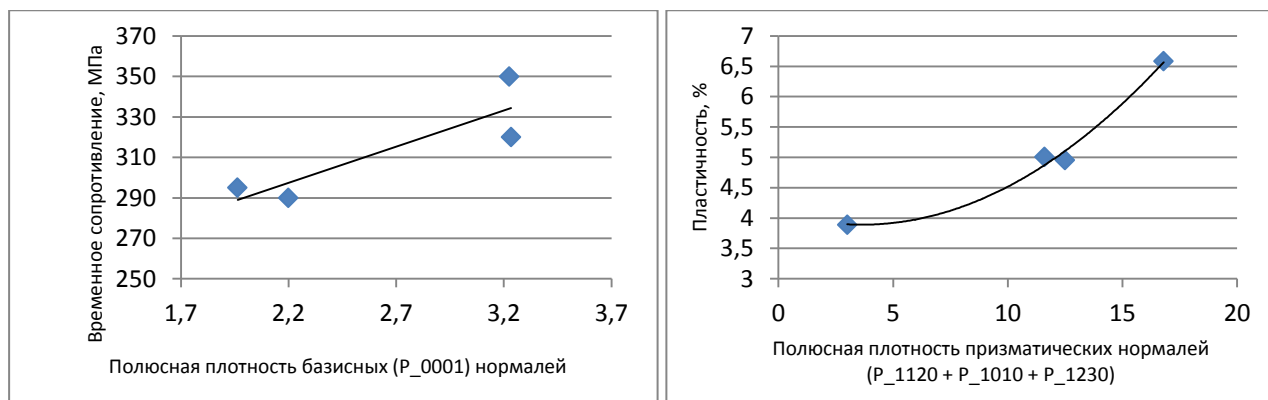
Результаты применения изучаемых режимов закалки со старением (с выдержкой от 96 до 120 ч) подтвердили, что при указанных режимах имеет место снижение прочностных свойств и повышение пластичности в продольном направлении и значительное увеличение прочности в поперечном направлении при достаточно низком уровне пластичности. Наибольшая величина временного сопротивления образцов при растяжении достигнута в поперечном направлении после выдержки 120 ч.

Таблица 9 – Результаты испытаний механических свойств образцов из среднегабаритных поковок, после ТО по различным режимам

Режим № п/п	Режим термической обработки	Направление вырезки образцов	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
ТО7	520 °С, выдержка 10 ч, охлаждение в воду 80 °С, + 200 °С, выдержка 96 ч	Продольное	$\frac{280-290}{285}$	$\frac{180-190}{185}$	$\frac{15,0-16,5}{16,0}$
		Поперечное	$\frac{335-345}{345}$	$\frac{215-230}{220}$	$\frac{3,0-4,5}{3,5}$
ТО8	520 °С, выдержка 10 ч, охлаждение в воду 80 °С, + 200 °С, выдержка 120ч	Продольное	$\frac{290-300}{295}$	185	$\frac{16,0-17,5}{16,8}$
		Поперечное	350	$\frac{225-235}{230}$	$\frac{2,8-3,6}{3,0}$

Как и при старении, вероятнее всего, повышение прочностных характеристик в поперечном направлении может быть связано с перераспределением упрочняющих легирующих компонентов Y и Zn между слоями нанодисперсной фазы LPSO основным α -твердым раствором, поскольку в целом фазовый состав сплава, исследованный методом растровой электронной микроскопии, сохраняется при всех изученных режимах закалки со старением.

По результатам проведенных исследований механических характеристик и рентгеноструктурного анализа построены графики зависимости характеристик пластичности и прочности от полюсной плотности призматических и базисных нормалей (Рисунок 14).



а

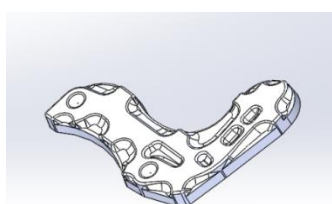
б

Рисунок 14 – Диаграмма зависимости механических и прочностных характеристик от полюсной плотности: а – временного сопротивления и полюсной плотности базисных нормалей; б – пластичности и полюсной плотности призматических нормалей

Анализ диаграмм показывает, что повышение полюсной плотности базисных нормалей приводит к повышению временного сопротивления, а увеличение полюсной плотности призматических нормалей приводит к повышению пластичности материала.

Проведены исследования влияния технологических параметров деформации и последующей термообработки на структуру, фазовый состав и механические свойства штампованных полуфабрикатов из сплава ВМД16. Для этого была разработана технология изготовления штамповки детали «кронштейн подлокотника» пассажирского авиационного кресла.

Штампованные полуфабрикаты массой 5 кг (шифр РЗ-26, размер 463 x 362 x 20 мм) (Рисунок 15) изготавливались на ПАО «КУМЗ» из промежуточной пресованной заготовки (полосы) сечением 40 x 310 мм.



а



б



б

Рисунок 15 – Штамповка детали «Кронштейна подлокотника»:

а – 3D модель, б – после деформации, в – после обрезки облоя и химического оксидирования.

Исследования и отработка технологических режимов деформации для получения штамповки детали «Кронштейн подлокотника» пассажирского кресла из жаропрочного магниевого сплава ВМД16 проводились по режимам: температура металла в начале штамповки 350-365 °С, температура металла в конце штамповки 350 - 380 °С, температура штампа в начале – 370 °С, температура штампа в конце – 360 °С.

Макроструктура однородная по всему сечению. Результаты исследования подтверждают, что структура мелкозернистая, излом чистый, без видимых инородных включений. Это позволяет получить стабильный уровень механических свойств по всему сечению штамповки.

Структура является типичной для кованных и штампованных полуфабрикатов из сплава ВМД16. Фазовый состав штамповок аналогичен фазовому составу мало- и среднегабаритных поковок. Это объясняется тем, что химический состав и параметры деформации очень близки и, следовательно, фазовый состав неизменен.

Механические свойства штамповок массой 5 кг из сплава ВМД16 представлены в таблице 10.

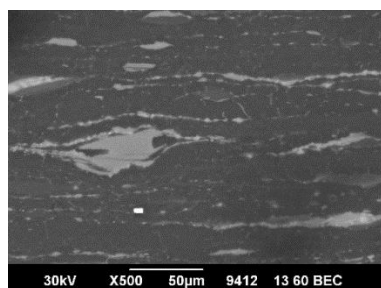
Таблица 10 – Механические свойства штамповок сплава ВМД16

Направление вырезки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma_{0,2}^c$, МПа	E^c , ГПа
Продольное	$\frac{325-340}{340}$	$\frac{270-275}{275}$	$\frac{8,1-10,0}{8,7}$	$\frac{250-260}{255}$	$\frac{44-45}{45}$
Поперечное	$\frac{285-290}{290}$	$\frac{245-250}{250}$	$\frac{3,2-4,9}{4,1}$	$\frac{220-225}{220}$	$\frac{44-45}{45}$

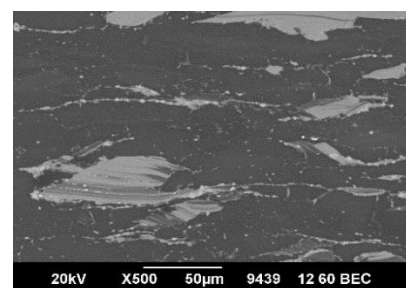
Анализ результатов испытаний показал, что значения условного предела текучести при сжатии всего на 6 – 7 % ниже, чем условный предел текучести при растяжении во всех исследуемых направлениях.

Для повышения характеристик пластичности были исследованы режимы отжига штамповок.

Микроструктура исследованных образцов штамповки после термической обработки представляет собой описанные ранее в данной работе вытянутые в продольном направлении зерна твердого раствора, легированного иттрием и цинком, строчечные выделения фрагментов эвтектики и интерметаллидных частиц на основе циркония (белые частицы округлой или кубической формы на фотографиях) (Рисунок 16).



а



б

Рисунок 16 – Микроструктура штамповки сплава ВМД16 после отжига:

а – 300 °С, 1 ч; б – 350 °С, 1 ч. РЭМ

Сравнение структуры штамповки, изученной методом РЭМ в исходном состоянии и после отжига, подтвердило увеличение размер зерен.

Механических свойств штамповок представлены в таблице 11.

Анализ полученных результатов показывает, что после воздействия отжига по режиму 350 °С в течение 1 часа прочностные характеристики при растяжении снижаются всего лишь на (5,9 – 9,0) %, при сжатии еще меньше – на (3,6 – 5,6) % в продольном направлении. Наиболее заметно изменение значений относительного удлинения при воздействии температур 300 и 350 °С в течение 1 часа. Здесь наблюдается повышение значений относительного удлинения, соответственно, на 3,3 % и в ~1, 2 раза в продольном направлении.

Таблица 11 – Механические свойства образцов из штамповок сплава ВМД16.

Режим термообработки	Направление вырезки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma_{0,2}^c$, МПа
-	Д	$\frac{325-340}{340}$	$\frac{270-275}{275}$	$\frac{8,1-9,3}{8,7}$	$\frac{250-260}{255}$
	П	$\frac{285-290}{290}$	$\frac{245-250}{250}$	$\frac{3,2-4,9}{4,1}$	$\frac{220-225}{220}$
300 °С, выдержка 1 ч	Д	$\frac{325-330}{330}$	$\frac{265-270}{265}$	$\frac{8,9-9,4}{9,0}$	$\frac{245-255}{250}$
	П	$\frac{280-285}{285}$	$\frac{235-240}{245}$	$\frac{3,4-4,8}{4,2}$	$\frac{195-22}{205}$
350 °С, выдержка 1 ч	Д	$\frac{315-320}{320}$	$\frac{250-255}{250}$	$\frac{10,4-10,7}{10,6}$	$\frac{235-245}{235}$
	П	$\frac{280-285}{285}$	$\frac{240-250}{245}$	$\frac{3,9-4,5}{4,1}$	$\frac{210-220}{205}$

Проведены огневые испытания при помощи газовой горелки при воздействии пламени с температурой 1100 °С в соответствии с методическим материалом ММ 1.2.216-2021 и ММ 1.2.217-2021. Полученные результаты испытаний приведены в таблице 12.

Минимальная температура, при которой начался процесс горения (рисунок 17 а) составила 812 °С. По мнению зарубежных коллег данная температура воспламенения позволяет считать сплав пожаробезопасным.



а



б

Рисунок 17 – Процесс горения поковки сплава ВМД16 (а) и внешний вид образца толщиной 5 мм из штамповки сплава ВМД16 после проведения огневых испытаний под воздействием пламени газовой горелки (б)

Таблица 12 – Результаты испытаний на воспламеняемость образцов толщиной 5 мм из штамповки и среднегабаритной поковки сплава ВМД16.

Номер образца	Вид п/ф	Продолжительность экспозиции в пламени горелки, с	Продолжительность остаточного горения до воспламенения, с	Температура воспламенения, °С
1	Штамповка	171	220	975
2		106	5	977
3		182	244	846
4		193	33	833
5		79	3	844
6	Поковка 10 кг	150	345	873
7		88	209	812
8		299	287	906
9		77	230	914
10		216	24	963

Анализ структуры методом РЭМ образцов после теплового воздействия показал, что наблюдается снижение толщины границ зерен и частичное растворение фрагментов эвтектики (Рисунок 18). Это является следствием реакции окисления иттрия и образования его оксида на поверхности образца.

Микроструктура образцов из сплава ВМД16 после проведения огневых испытаний соответствует структуре сплава в литом состоянии.

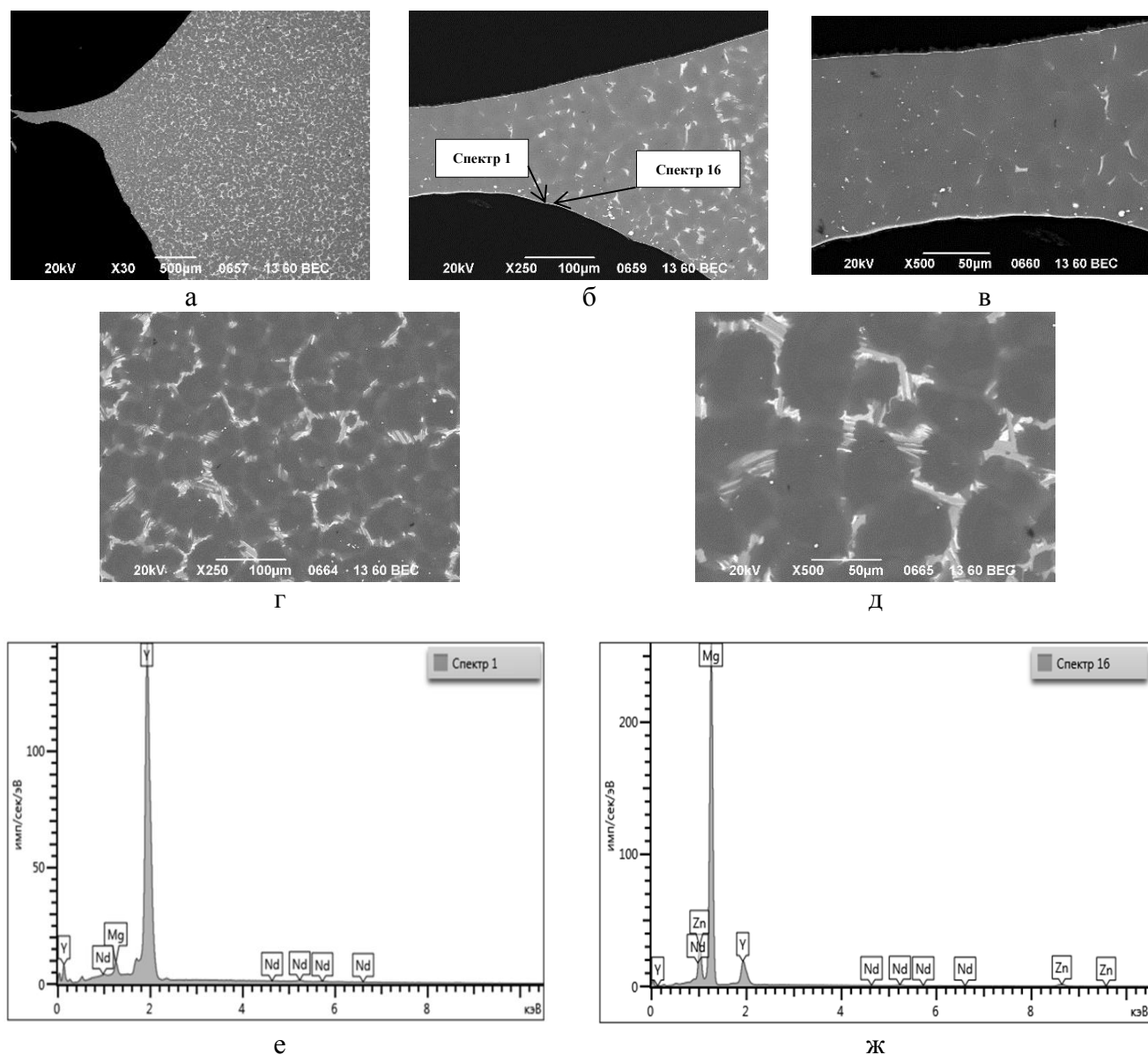


Рисунок 18 – Микроструктура штамповки сплава ВМД16 после проведения огневых испытаний в зоне воздействия высокой температуры (а – $\times 30$; б, г – $\times 100$, в, д – $\times 500$) РЭМ; е, ж – локальный элементный состав на поверхности образца

Из-за высокого сродства к кислороду как магния, так и иттрия, при воздействии высокой температуры происходит диффузия элементов к поверхности, где происходит взаимодействие с кислородом с образованием оксидных пленок MgO , Y_2O_3 и других легирующих элементов, что значительно повышает порог воспламеняемости сплава.

В четвертой главе представлен перечень разработанной нормативной документации и результаты проведения общей квалификации (паспортизации) кованных полуфабрикатов.

В пятой главе представлена практическая реализация полученных в работе результатов: приведены результаты стендовых испытаний деталей, изготовленных из среднегабаритных и малогабаритных поковок и штамповок из сплава ВМД16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследовано влияние технологических параметровковки и штамповки на структуру, фазовый состав и прочностные свойства деформированных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава ВМД16 системы Mg-Zn-Zr-PЗМ. Наличие термостабильных упрочняющих фаз $ZrZn_2$, $(Mg, Zn)_5Y$, $Mg_{12}Nd$, $Mg_{12}La$, $Mg_{12}ZnY$ позволяет применять режимы деформации с широким интервалом температур: температура нагрева заготовок 350 – 420 °С, температура нагрева инструмента не более 370 °С. Структура и фазовый состав способны сохранять стабильность, а также высокий уровень прочностных свойств в интервале (20 - 300) °С за счет того, что границы зерен заблокированы частицами фрагментов устойчивой остаточной эвтектики, а пластины наноразмерных LPSO – фаз пронизывают объем каждого зерна.

2. Применение разработанных схем деформации при изготовлении малогабаритной поковки позволяет добиться в горячекованом состоянии отсутствия анизотропии механических свойств по пределу прочности и текучести, причем применение усиленной схемыковки приводит к повышению прочностных характеристик на 5 % в продольном направлении при снижении на 6 % в поперечном.

3. Исследовано влияние термической обработки на структуру, фазовый состав и свойства кованных и штампованных полуфабрикатов из жаропрочного деформируемого магниевого сплава. Установлено, что:

- заметное разупрочнение полуфабрикатов происходит при температурах отжига свыше 400 °С;

- в процессе проведения термической обработки по режимам Т1 и Т6, предусматривающим длительную выдержку (96 - 120 ч), в продольном направлении имеет место снижение прочностных и повышение пластических свойств; при этом в поперечном направлении этих полуфабрикатов наблюдается увеличение прочностных свойств и заметное снижение характеристик пластичности за счет активизации диффузионных процессов, приводящих к частичному растворению интерметаллидных фаз, содержащих Zn, Y и La, и перераспределению текстурных компонентов.

4. Проведенные огневые испытания полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава ВМД16 показали, что минимальная температура воспламенения составляет 812 °С, что позволяет считать сплав пожаробезопасным. Установленная температура превышает порог воспламеняемости серийных деформируемых магниевых сплавов не менее чем на 350°С.

5. Проведена общая квалификация малогабаритных и среднегабаритных поковок из сплава ВМД16, выпущены два дополнения к паспорту; разработаны нормативные документы, включая Технологические Рекомендации (2), Изменение к ТР (1), Технические Условия (2) и Изменение к ТУ (1).

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях, в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В., Филонова Е.В., Алиханян А.А. Исследование закономерностей влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства среднегабаритных поковок из жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1. С. 13 - 26. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26

2. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Исследование влияния легирующих элементов на температурный порог воспламенения и огнестойкость деформируемого магниевого сплава марки ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3(68). С. 60 – 74. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74

3. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В. О природе жаропрочности деформируемого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 4 (790). С. 21-27. DOI: 10.30906/mitom.2021.4.21-27.

Патент:

1. Патент 2598424 Российская Федерация, МПК:С22F 1/06 Способ обработки магниевых сплавов / Каблов Е.Н., Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А., Мостяев И.В.; заявитель и правообладатель ФГУП «ВИАМ» 2015121084/02 заявл. 03.06.2015; опубл. 27.09.2016, бюл. №27.

Публикации, индексируемые базами Web of Science и Scopus:

1. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Effect of high – temperature heating on the structure phase composition, and properties of small stampings made of a VMD16 magnesium alloy // Russian metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021. №11. P. 1402-1408. DOI: 10.1134/S0036029521110112

2. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V. Natyre of high-temperature strength of deformed magnesium alloy of the Mg-Zn-Zr-REE system // Metall Science and Heat Treatment. 2021. Vol. 63. Issue 3-4. P. 190-196. DOI:10.1007/s11041-021-00669-7

3. Volkova E.F., Mostyaev I.V. Effect of some impurities on the structure, the phase composition, and the properties of magnesium alloys containing rare-earth elements // Russian metallurgy (Metally). 2018. Vol. 2018. Issue 1. P. 56-62. DOI: 10.1134/S0036029518010135

4. Volkova E.F., Duynova V.A., Mostyaev I.V. Effect of the phase composition on the properties of a complex magnesium alloy at temperatures from -70 to +300 °C // Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. Issue 9.P. 718-723. DOI:10.1134/S0036029517090154

Другие публикации:

1. Мостяев И.В., Трофимов Н.В., Леонов А.А. Магниеые сплавы нового поколения с повышенной температурой воспламенения для элементов внутреннего набора планера // В книге: Молодежь и будущее авиации и космонавтики. Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов. Москва. 2022. С. 193-195.

2. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В. Роль РЗЭ в формировании фазового состава нового магниевого сплава базовой системы Mg-Zn-Zr // В сборнике: Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. 2016.С. 13.

Автореферат И.В. Мостяева

«Исследование влияния технологических параметровковки, штамповки и термической обработки на структуру, фазовый состав и уровень свойств деформированных полуфабрикатов из жаропрочного магниевого сплава марки ВМД16»

Подписано в печать 2024 г. Заказ ...

Формат бумаги 60 × 90/16. Печ. л 1.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.
105005, г. Москва, ул. Радио, 17.