

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Г.Г. Михайлов

_____ 2019 г.

Исследование гомогенизирующего отжига литых заготовок
алюминиевых сплавов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–22.03.01.2019.009. ПЗ ВК НИР

Руководитель работы, доцент, к.т.н.

_____ С.И. Ильин

_____ 2019 г.

Автор ВКР

студент группы П-436

_____ А.С.Иванова

_____ 2019 г.

Нормоконтролер, профессор, к.т.н.

_____ Ю.С. Кузнецов,

_____ 2019 г.

Челябинск 2019

АННОТАЦИЯ

Иванова А.С.. Изучение кинетики гомогенизации при отжиге литых алюминиевых сплавов. – Челябинск: ЮУрГУ, П-436, 2018. – ,43, с., ,22, ил., ,9, табл., библиогр. список – ,15, наим..

Объект исследования: литой алюминиевый деформируемый сплав Д16.

Цель работы – изучить кинетику гомогенизации литого алюминиевого сплава Д16 путём измерения химического состава локальных объёмов дендритных и междендритных областей.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) выполнен литературный обзор по исследуемой теме,
- 2) исследованы микроструктура образцов, проведен химический анализ состава образцов,
- 3) проведен гомогенизационный отжиг образцов, повторный анализ химического состава образцов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сплав Д16, гомогенизирующий отжиг, степень гомогенности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	7
1.1 Общая характеристика и классификация алюминиевых сплавов.....	7
1.2 Литые деформированные алюминиевые сплавы типа Д16.....	8
1.3 Технология получения высокопрочных алюминиевых сплавов прокатной группы.	11
1.4 Технология отделки листового проката из сплава Д16.....	13
1.5 Физико-химические свойства сплава	14
1.6 Термическая обработка слитков	16
1.7 Методы оценки ликвации и степени гомогенности литых сплавов	23
2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	24
2.1 Объект исследования	24
2.2 Пробоподготовка	25
2.3 Микроструктурные исследования	26
2.4 Проведение гомогенизационного отжига и повторное измерение состава образцов.....	27
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	28
3.1 Исследование микроструктуры образцов	28
3.2 Оценка химического состава.....	29
3.3 Оценка состава и структуры сплава после проведения гомогенизационного отжига	32
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	31

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет алюминиевые сплавы имеют колоссальное значение в конструкциях авиационной и космической техники. Эти сплавы характеризуют высокой удельной прочностью, способностью сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам, хорошей технологичностью. По удельной прочности некоторые алюминиевые сплавы приближаются или соответствуют высокопрочным сталям. Большинство алюминиевых сплавов имеют хорошую коррозионную стойкость, высокие теплопроводности, электропроводимость и хорошие технологические свойства (обрабатываются давлением, свариваются точечной сваркой, а специальные - сваркой плавлением, в основном хорошо обрабатываются резанием). Алюминиевые сплавы пластичнее магниевых и многих пластмасс. Большинство из них превосходят магниевые сплавы по коррозионной стойкости, пластмассы - по стабильности свойств.

Д16 – один из самых востребованных дюралюминиевых сплавов в судостроительной, авиационной и космической промышленности. Главное его преимущество заключается в том, что получаемый из него металлопрокат обладает:

- стабильной структурой;
- высокими прочностными характеристиками;
- в 3 раза более легким весом, чем стальные изделия;
- повышенным сопротивлением микроскопической деформации в процессе эксплуатации;
- хорошей механической обрабатываемостью на токарных и фрезеровочных станках, уступая лишь некоторым другим алюминиевым сплавам.

В связи с этим, изделия не требуют дополнительной термообработки и позволяет избежать такой распространенной проблемы, как уменьшение размеров заготовок после естественной или искусственной закалки, которая характерна для изделий, выполненных из сплава Д16.

Ввиду высокой прочности, твердости и легкости, сплав Д16 используется для изготовления различного металлопроката. Он востребован в различных промышленных областях:

- в конструкциях самолетов и судов и космических аппаратов;
- для изготовления деталей для машин и станков;
- для производства обшивки и лонжеронов автомобилей, самолетов, вертолетов;
- для изготовления дорожных знаков и уличных табличек.

Незаменимы трубы Д16 при производстве нефтяного сортамента. Эксплуатационные колонны, собранные из них способны обеспечить бесперебойную эксплуатацию скважины в течение 8 лет.

В отличие от стального трубного проката, дюралюминиевые трубы пластичны, легки в транспортировке, прочны и имеют гладкую поверхность

Гомогенизация отливок из литых алюминиевых сплавов имеет приоритетное значение для улучшения их технологических параметров. Режим гомогенизирующего отжига регулируется двумя параметрами – температурой и временем выдержки [2]. Для оценки степени гомогенности расплава после таких термообработок на предприятиях, как правило, используются различные методы механических испытаний.

В работе рассматривается метод расчёта исследования степени гомогенности литой структуры на примере алюминиевого сплава Д16. Предлагаемая методика заключается в сравнении химического состава в дендритных и междендритных участках и расчёте на основании полученных значений критерия гомогенности.

На основе проведенного литературного обзора определили цель работы – изучить кинетику гомогенизации литого алюминиевого сплава Д16 путём измерения химического состава локальных объёмов дендритных и междендритных областей. Определены задачи работы:

- 1) исследование микроструктуры образцов,
- 2) оценка химического состава образцов,
- 3) оценка состава и структуры сплава после проведения гомогенизационного отжига.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Общая характеристика и классификация алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы - сплавы на основе алюминия (Al) с добавками Cu, Mg, Zn, Si, Mn, Li, Cd, Zr, Cr и других элементов; характеризуется малой плотностью, высокой удельной прочностью при достаточно удовлетворяющей пластичности, электро- и теплопроводностью, а также хорошей коррозионной стойкостью [1]. Алюминиевые сплавы обладают рядом полезных свойств - высокой электро- и теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью. Применяются во многих отраслях машиностроения. По способу производства алюминиевые сплавы подразделяют на деформируемые, литые и спеченные.

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются Cu, Mg, Si, Mn, Zn; реже - Li, Ni, Ti. Многие легирующие элементы образуют с алюминием твердые растворы ограниченной переменной растворимости и промежуточные фазы. Это дает возможность подвергать сплавы упрочняющей термической обработке, которая заключается в закалке для получения пересыщенного твердого раствора.

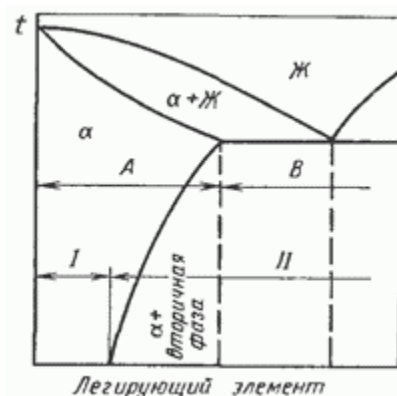


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент (схема):
А – деформируемые сплавы; В – литейные сплавы; I, II – сплавы, неупрочняемые
и упрочняемые термической обработкой соответственно

Конструкционная прочность алюминиевых сплавов зависит от примесей Fe и Si. Они образуют в сплавах нерастворимые в твердом растворе фазы: $FeAl_3$, $\alpha(Al,$

Fe, Si), β (Al, Fe, Si) и др. Независимо от формы (пластинчатой, игольчатой и др.) кристаллы этих фаз снижают пластичность, вязкость разрушения, сопротивление развитию трещин [15]. Легирование сплавов марганцем уменьшает вредное влияние примесей, так как он связывает их в четвертую фазу α (Al, Fe, Si, Mn), кристаллизующуюся в компактной форме.

1.2 Литой деформируемый алюминиевый сплав Д16

Высокопрочный сплав Д16 (ГОСТ 4784-97) — это высокопрочный термоупрочняемый сплав алюминия с марганцем, магнием и медью. Он интенсивно упрочняется термической обработкой. Сплав хорошо деформируется в горячем и холодном состоянии. Горячая деформация возможна в широком интервале температур от 350° до 450° С. Деформации при комнатной температуре сплав может подвергаться как в отожженном, так и в закаленном состоянии. Механические свойства полуфабрикатов после закалки и естественного старения в значительной мере зависят от условий предварительной обработки.

Алюминиевый сплав Д16 ввиду его высокой прочности, широко используется в авиационной, космической и ракетной промышленности. Из него изготавливают основные силовые элементы для гражданских и сверхзвуковых самолетов — обшивку, шпангоуты, стрингеры, лонжероны, лопасти, которые работают в условиях постоянного сжатия и температуре окружающей среды не выше 100–120 °С, так как механические свойства этого материала деградируют при температуре свыше 120 °С. В остальном же при обычных условиях - это самый прочный и твердый сплав достаточно стойкий к коррозии

Таблица 1.1 – Механические свойства при $T = 20^{\circ}\text{C}$ материала Д16

Механические свойства сплава Д16 при $T=20^{\circ}\text{C}$										
Прокат	Толщина или диаметр, мм	E, ГПа	G, ГПа	$\sigma-1$, ГПа	σ_b , (МПа)	$\sigma_{0,2}$, (МПа)	δ_5 , (%)	ψ , %	$\sigma_{сж}$, МПа	KCU, (кДж/м ²)
Лист	2-4	72		130	450	320	19			
Лист	30-40				460	360	10			
Профиль прессованный закаленный и искусственно состаренный	5-10	72		140- 150	480	350	12			

Впервые он был использован при создании бомбардировщика ТУ-16, а затем в первом пассажирском самолете ТУ-104. Однако, в дальнейшем он показал склонность к усталостному растрескиванию, в связи с чем были введены жесткие ограничения на содержание в нем примесей железа и кремния. Это способствовало повышению ударной вязкости, пластичности, статической выносливости и снижению чувствительности к надрезу образцов, возникающей при перекосах. Также кардинально удалось увеличить стойкость к расслаивающей коррозии, появляющейся в сплаве под напряжением, путем внедрения более мягкого ступенчатого старения.

Снижение плотности — наиболее эффективный путь повышения удельной прочности и удельного модуля упругости, что достигается путем легирования алюминия литием и магнием.

Сплавы типа Д16 путем термической обработки получают упрочнение в большей мере, чем другие алюминиевые сплавы. Время выдержки как при температуре закалки, так и при искусственном старении может резко изменяться в зависимости от толщины и структуры сплава. Эти сплавы после закалки получают значительное упрочнение, но еще сохраняют достаточно высокую пластичность,

благодаря чему поддаются хорошей деформации [3]. Необходимо учитывать, что деформирование, выполненное в процессе естественного старения, у многих сплавов вызывает снижение предела прочности на 2 кГ/мм² по сравнению с пределом прочности, получаемым при старении сплавов после деформирования [13].

Таблица 1.2 – Типичный химический состав и области применения алюминиевого деформируемого сплава Д16

Химический состав в % сплава Д16	
Fe	до 0,5
Si	до 0,5
Mn	0,3 - 0,9
Ni	до 0,1
Ti	до 0,1
Al	90,8 - 94,7
Cu	3,8 - 4,9
Mg	1,2 - 1,8
Zn	до 0,3



Сплаву присущи следующие недостатки:

- 1) пониженная пластичность;
- 2) повышенная чувствительность к коррозии под напряжением;
- 3) большая чувствительность к повторным нагрузкам и действию острых надрезов, чем у сплава типа дуралюмин;
- 4) склонность к резкому снижению прочностных характеристик с повышением температуры выше 140°C.

1.3 Технология получения высокопрочных алюминиевых сплавов прокатной группы

Отливки из алюминиевых сплавов изготавливают всеми известными способами литья. Около 70—80 % отливок получают литьем в многократные формы (в кокиль, под давлением, под низким давлением) и 20—30 % — литьем в разовые формы (песчаные, гипсовые, оболочковые, по выплавляемым моделям). Назначение того или иного способа литья для изготовления конкретной отливки определяется уровнем требований к их качеству (механическим свойствам, точности размеров, чистоте поверхности), техническими возможностями каждого из способов и экономическими соображениями (необходимостью изготовления отливки с минимальными затратами труда и материалов и минимальной себестоимостью) [4].

Литье в многократные (металлические) формы обеспечивает получение отливок с более высокими свойствами и меньшим расходом металла, чем литье в разовые формы. Поэтому для крупносерийного и массового производства отливок из алюминиевых сплавов экономически целесообразным является литье в кокиль и под давлением. В серийном и мелкосерийном производстве экономически выгодным может оказаться литье в разовые формы. Независимо от способа изготовления отливки из алюминиевых сплавов по условиям службы делят на три категории ответственности. К категории I относят отливки, подверженные значительным напряжениям, длительно работающие в неблагоприятных условиях. Их подвергают

индивидуальному контролю рентгенопросвечиванием, флуоресцентному контролю, контролю вихревыми токами. К категории II относят отливки со средней нагруженностью, работающие в нормальных условиях. Они проходят выборочный контроль рентгенопросвечиванием. Малонагруженные отливки, не подвергающиеся рентгенопросвечиванию, относят к III категории ответственности [9].

Алюминиевые сплавы прессуют в основном из круглых заготовок. Сортамент пресс-изделий — профили, панели, трубы, прутки. Число видов прессованных профилей исчисляется десятками тысяч. Прессованием сплошных заготовок через комбинированные матрицы можно получить полые профили практически любой конфигурации как наружного, так и внутреннего контура.

Техника прессования алюминиевых сплавов относительно других металлов находится на самом высоком уровне. Все промышленно освоенные прогрессивные разновидности процесса применяются в прессовании алюминиевых сплавов.

Сплавы типа Д16 допускают очень невысокие скорости истечения. Это — серьезный недостаток таких сплавов, которые обладают рядом ценных свойств и поэтому широко применяются в различных отраслях техники. Ограничение скоростей истечения объясняется следующим. При горячем прессовании, как при любой деформации, энергия деформации в значительной степени преобразуется в тепло: чем более прочный сплав, тем этого тепла выделяется больше. При прессовании на низких скоростях деформационное тепло успевает рассеиваться через инструмент в более холодную окружающую среду. Но если скорость прессования повышать, то могут создаваться такие условия, при которых тепла в прессуемой заготовке образуется больше, чем рассеивается, и температура заготовки из алюминиевого сплава начинает повышаться.

Уже при небольшом повышении температуры относительно температуры наивысшей пластичности резко снижается пластичность и в профиле начинают образовываться разрушения металла — термические трещины. Это значит, что

такие сплавы прессуются в узком температурном интервале. Профиль с термическими трещинами является браком, и возникновение их — сигнал прессовщику о снижении скорости истечения. Поэтому прессовщик при прессовании медленно прессуемых высокопрочных алюминиевых сплавов должен выдерживать максимально возможные скорости прессования, так как от этого прямо зависит съем продукции с прессы и, следовательно, сменная выработка, но и не слишком их увеличивать, так как может начаться образование термических трещин. Разработаны и применяются способы увеличения скоростей истечения медленно прессуемых высокопрочных алюминиевых сплавов. Прежде всего — это перевод прессования с прямого метода на обратный, а также снижение начальной температуры прессования, прессование со смазкой [12].

1.4 Технология обработки листового проката из сплава Д16

Обработка листов в состояниях после отжига и различных степеней нагартовки осуществляется на специальной линии. Технические характеристики машин приведены ниже при описании работы линий обработки тонких твердых листов.

Качество поверхности, геометрия листов и выкатка должны удовлетворять требованиям ГОСТ 12592—67.

Технологический цикл производства листов и плит из термически упрочняемых сплавов состоит из упрочняющей термической обработки (закалка и старение) и обработки на механизированных линиях непрерывным потоком.

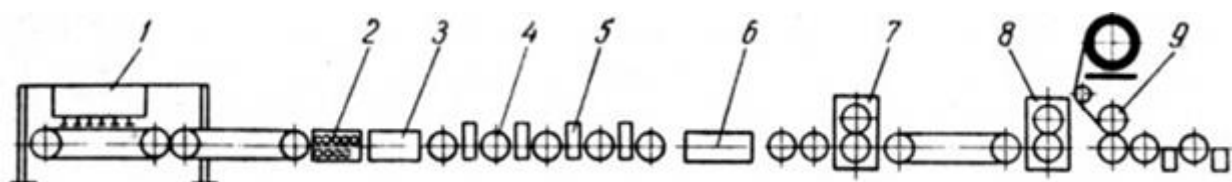


Рисунок 1.2 – Линия обработки толстых листов:

Толстые закаленные листы из сплавов Д16 изготавливают толщиной 4 – 10,5 мм. Порезанные в меру (с припусками по длине под закалку) и выправленные на многовалковой правильной машине горячекатаные листы проходят закалку в воздушной садочной электрической печи с циркуляцией воздуха.

После закалки листы обрабатывают на специальной линии. На этой линии проводится отделка толстых закаленных листов шириной 1200, 1500, 2000 мм и длиной 4 – 10 м. На линии производят следующие операции:

- 1) предварительную правку с целью снятия грубого коробления после закалки,
- 2) прогладку на стане кварто 2800 за 3 – 5 проходов с общим обжатием не более 2% для полного снятия коробления и волнистости по кромкам,
- 3) правку листов на растяжной машине с деформацией от 2 до 3% с целью полного устранения волнистости по всей поверхности листа,
- 4) обрезку кромок листа, поврежденных губками растяжной машины, и одновременно обрезку в меру и отбор образцов на механические испытания,
- 5) окончательную правку листов на роликовой листопрямительной машине,
- 6) контроль выкатки, геометрии и качества поверхности листов на контрольных плитах,
- 7) строчечную красочную маркировку листов,
- 8) промасливание листов,
- 9) упаковку.

1.5 Физико-химические свойства сплава

Структура и свойства деформированных полуфабрикатов во многом зависят от качества слитка. Строение слитка определяется формой и размерами зерна и его внутренним строением. Зерно алюминиевого твердого раствора представляет собой дендрит, выросший из одного центра кристаллизации, оно легко выявляется при макроисследовании. Зерна по размерам могут быть крупными или мелкими, а по форме равноосными, столбчатыми и веерными. Внутреннее строение зерна определяется формой и размерами первично кристаллизовавшихся ветвей

дендрита, а также формой, размерами и расположением интерметаллидов. По внешнему виду зерна нельзя судить о внутреннем строении. При любом размере зерна ветви могут быть и тонкими, и толстыми, а соответственно этому интерметаллиды — и мелкими, и крупными. Чем тоньше ветви (чем меньше размер дендритной ячейки) и чем мельче интерметаллиды, залегающие в междендритных пространствах, тем тоньше внутреннее строение [4]. Уровень механических свойств сплавов в литом и термически обработанном состоянии определяется в основном внутренним строением зерна и в меньшей степени его размерами и формой: чем тоньше внутреннее строение, тем выше и прочность, и пластичность.

Размер зерна зависит от ряда факторов. Зерно измельчается при низкой температуре литья, в случае присутствия в расплаве тонких взвесей неметаллической природы, при введении в сплав добавок тугоплавких металлов, образующих первично кристаллизующиеся мелкокристаллические выделения. Укрупняется зерно при перегревах расплава, высоких температурах литья, повышении чистоты расплава (отсутствии взвесей). Увеличение скорости кристаллизации способствует вначале измельчению, а затем укрупнению зерна, причем выражено это тем сильнее, чем менее легирован сплав. Склонность к образованию столбчатой структуры тем больше, чем выше скорость кристаллизации. Если на размер зерна влияет большое число факторов, то на внутреннее строение фактически влияет только скорость охлаждения - чем она выше, тем тоньше внутреннее строение зерна и тем выше прочность и пластичность сплава.

Влияние внутреннего строения зерна в слитке на конечные свойства полуфабрикатов, полученных с применением высоких степеней деформации, объясняется тем, что выделившиеся при кристаллизации химические соединения при деформации дробятся, однако конечный размер после такого дробления зависит от размера этих соединений в литой структуре. В этом кроется основная

причина наследственной зависимости свойств полуфабрикатов от свойств слитка. Чем меньше степень деформации, тем эта наследственность ярче выражена.

Добиваясь тонкого внутреннего строения, необходимо получить также и мелкозернистую структуру. Такая структура уменьшает склонность сплава к образованию при литье горячих трещин, особенно поверхностных, повышает пластичность при горячей деформации, а в случае малых степеней деформации улучшает свойства готовых полуфабрикатов.

Химический состав литого металла по сечению ветвей дендрита неодинаков из-за дендритной ликвации, которая возникает вследствие различия состава жидкости и кристаллизующейся из нее твердой фазы.

В результате процессов, происходящих при кристаллизации слитков и отливок из алюминиевых сплавов в реальных производственных условиях, их структура оказывается неравновесной. Основные особенности неравновесной литой структуры заключаются в следующем:

- 1) Легирующие элементы и примеси неравномерно распределяются по объему дендритов твердого раствора. Периферийные зоны дендритных ветвей обогащены элементами, понижающими температуру плавления алюминия (медью, цинком, магнием, кремнием, марганцем), и обеднены элементами, повышающими его точку плавления (хромом, цирконием, титаном),
- 2) в литом металле могут присутствовать «лишние» фазы, которых не должно быть при равновесной кристаллизации; в частности, фазы, входящие в неравновесные эвтектики, и первичные интерметаллиды, не успевшие прореагировать с алюминиевым твердым раствором по перитектической реакции,
- 3) фазы, взаимодействующие с алюминием по эвтектической реакции, располагаются по границам дендритных ячеек, а взаимодействующие с алюминием по перитектической реакции – в центре зерна.

1.6 Термическая обработка слитков

Термическая обработка слитков и деформированных полуфабрикатов является мощным средством воздействия на их структуру и свойства. Большое

разнообразие структур, которые могут быть получены в алюминиевых сплавах после различной термообработки. – результат различной степени отклонения сплавов от термодинамически равновесного состояния при комнатной температуре.

Равновесная структура промышленных алюминиевых сплавов, суммарное содержание легирующих компонентов в которых, за редким исключением, не превышает 15 – 18%, представляет собой твердый раствор с низким содержанием легирующих компонентов (десятые доли процента) с включениями интерметаллидных фаз [6]. При таком фазовом составе сплавы, как правило, обладают низкой прочностью и очень высокой пластичностью. Самой неустойчивой при комнатной температуре структурой в алюминиевых сплавах, имеющих фазовые превращения в твердом состоянии (термически упрочняемых сплавах), является пересыщенный твердый раствор легирующих компонентов в алюминии, концентрация которых может в десятки раз превышать равновесную. При такой структуре алюминиевые сплавы также пластичны, но значительно прочнее, чем в равновесном состоянии.

Для достижения максимальной прочности термически упрочняемых сплавов необходимо за счет регламентированных нагревов получить некоторую промежуточную структуру, которая соответствует начальным стадиям распада пересыщенного твердого раствора.

Термической обработкой можно достичь большого разнообразия структур и в сплавах, не имеющих фазовых превращений в твердом состоянии, но только в том случае, когда исходное неравновесное состояние получено либо при литье (в процессе неравновесной кристаллизации), либо путем деформации.

Для достижения максимальной прочности, для алюминиевых сплавов широкое распространение получили три вида термообработки: отжиг, закалка и старение

Алюминиевые сплавы отжигают тогда, когда возникающая по тем или иным причинам неравновесная структура обуславливает появление нежелательных

свойств, чаще всего пониженной пластичности. Наиболее распространены три разновидности неравновесных состояний алюминиевых сплавов:

1) неравновесное состояние, свойственное литым сплавам. Скорости охлаждения сплавов при литье слитков, а также при всех видах фасонного литья значительно превышают скорости охлаждения, необходимые для равновесной кристаллизации. Наличие хрупких интерметаллидных ободков по границам дендритных ветвей, обуславливают пониженную пластичность литых сплавов, а отсюда трудности их деформации. Особенно это относится к высоколегированным высокопрочным сплавам. Неоднородность структуры, свойственная слитку, проявляется и после обработки давлением в деформированном изделии.

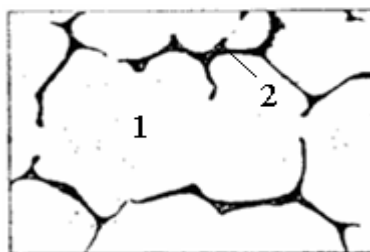


Рисунок 1.3 – Микроструктура слитка сплава:

1 – дендрит; 2 – междендритная область

2) неравновесное состояние, вызванное пластической деформацией. Основные особенности структуры деформированного алюминия и алюминиевых сплавов, а также причины нестабильности, неустойчивости деформированного металла описаны выше,

3) неравновесное состояние, являющееся результатом предыдущей термической обработки. Основная особенность такого состояния — присутствие в сплаве более или менее пересыщенного (легирующими компонентами) твердого раствора на основе алюминия. Между этим неравновесным состоянием и двумя выше рассмотренными имеется принципиальное отличие: оно может быть получено только в сплавах, упрочняемых термической обработкой, в то время как первые два наблюдаются и в сплавах без фазовых превращений в твердом состоянии, и в сплавах с такими превращениями.

Все рассмотренные разновидности неравновесных структур могут-быть устранены отжигом, причем во всех случаях после отжига повышается - пластичность (хотя другие свойства в зависимости от исходного состояния меняются по-разному). Очевидно, что процессы, происходящие при отжиге литого, деформированного и предварительно термически обработанного материала, различны, а следовательно, необходимо выбирать и разные режимы отжига.

В соответствии с тремя рассмотренными выше разновидностями неравновесных состояний, наблюдающихся у алюминиевых сплавов, различают три разновидности отжига:

- 1) гомогенизационный отжиг слитков.
- 2) рекристаллизационный отжиг (полный или неполный) деформированных изделий.
- 3) отжиг термически упрочненных сплавов с целью разупрочнения.

Гомогенизация – разновидность отжига, которую широко применяют для деформируемых алюминиевых сплавов. В технологическом процессе производства деформированных полуфабрикатов (листов, профилей, штамповок и т. д.) гомогенизация является первой термической обработкой. Слиток с неоднородной термодинамически неустойчивой структурой подвергают гомогенизации, в результате которой его структура становится более гомогенной, пластичность повышается, что позволяет значительно интенсифицировать последующую обработку давлением (прессование, прокатку) и уменьшить технологические отходы. В ряде случаев гомогенизация позволяет также улучшить свойства деформированных изделий.

Основные параметры режима гомогенизационного отжига - температура и время выдержки. Скорости нагрева имеют несущественное значение.

Скорость гомогенизационного процесса определяется коэффициентами диффузии легирующих компонентов, возрастающих с повышением температуры.

Ориентировочно можно принять, что с увеличением температуры на 40—50° С коэффициенты диффузии возрастают на порядок [7].

Выбор температуры гомогенизации сплавов: она должна быть выше температуры полного растворения легирующих компонентов в алюминии. Кроме того, при выборе температуры гомогенизации следует учитывать наличие в слитке неравновесной эвтектики, температура плавления которой равна T_v . Если слиток быстро нагреть до температуры выше, то эвтектика расплавится, образовавшаяся жидкость через некоторое время рассосется, поскольку медь из нее продиффундирует в твердый раствор. При термической обработке не допускают нагревов до появления жидкой фазы, поскольку это сопровождается межзерненным окислением и образованием пористости, что приводит к резкому снижению прочности и особенно пластичности сплавов [5].

Учитывая, что гомогенизации подвергают массивные слитки, межзерненное окисление которых происходит лишь в тонком поверхностном слое, в последние годы слитки, предназначенные для некоторых прессованных изделий, гомогенизируют при температуре выше температуры плавления неравновесной эвтектики. Такая обработка, называемая высокотемпературной гомогенизацией, позволяет улучшить механические свойства некоторых прессованных изделий в поперечном направлении.

Выдержка при температуре гомогенизации должна обеспечить полное растворение неравновесных эвтектических включений фазы Al-Cu [14]. Выдержка должна быть тем больше, чем грубее эти включения, величина которых зависит от скорости кристаллизации при литье. Отсюда следует, что длительность гомогенизации крупных слитков должна быть больше, чем мелких. В общем случае выдержка при гомогенизации зависит от коэффициента диффузии в алюминии компонентов, содержащихся в растворяемой фазе.

Температура гомогенизации для промышленных алюминиевых сплавов колеблется в пределах от 450 до 540° С, а выдержка — от 4 до 40 ч [11].

Скорость охлаждения при гомогенизации обычно не регламентируют, слитки охлаждают вместе с печью или на воздухе. При таком сравнительно медленном охлаждении растворенные легирующие компоненты снова выделяются из твердого раствора в виде вторичных интерметаллидных кристаллов. Однако, эти кристаллы гораздо меньше имевшихся до гомогенизации эвтектических включений и более равномерно распределены, поэтому пластичность сплава остается достаточно высокой.

Таким образом, выдержка слитков из алюминиевых сплавов, в состав которых, кроме меди, магния, цинка, кремния, входят марганец, цирконий, титан и некоторые другие переходные металлы, при температуре 450— 500° С не является в полном смысле гомогенизацией, так как эта выдержка, оказывая определенное гомогенизирующее действие, приводит вместе с тем и к некоторой гетерогенизации структуры. Дисперсные частицы марганцевых, хромовых, циркониевых интерметаллидов влияют на температуру рекристаллизации деформированных изделий. При оптимальной дисперсности марганцевых (хромовых, циркониевых) интерметаллидов, температура рекристаллизации некоторых полуфабрикатов из ряда алюминиевых сплавов может быть выше температуры конечной термической обработки. В этом случае в готовых изделиях (после их термообработки) сохраняется нерекристаллизованная структура, обуславливающая значительный прирост прочности (структурное упрочнение).

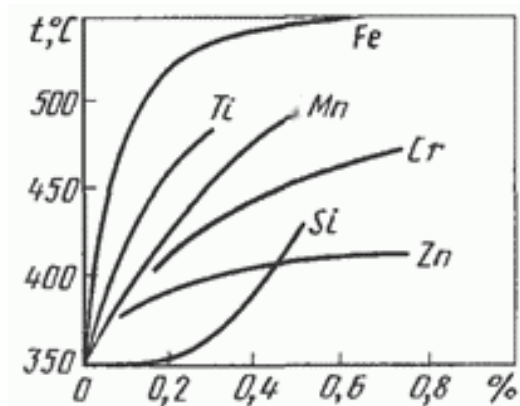


Рисунок 1.4 – Влияние легирующих элементов на температуру рекристаллизации алюминия

Правильно выбранный режим гомогенизации слитков должен обеспечить достаточно полное растворение неравновесных эвтектических включений интерметаллидов меди, магния, кремния, цинка, а также оптимальную степень распада твердого раствора имеющихся в сплаве переходных металлов в алюминии. Гомогенизация при слишком высокой температуре или слишком длительная гомогенизация может вызвать коагуляцию продуктов распада твердых растворов Mn (Cr, Zr) в алюминии и практически полностью исключить полезное влияние этих компонентов на свойства готовых изделий [8]. Отсутствие гомогенизации или недостаточная гомогенизация обуславливает сохранение части переходных металлов в твердом растворе, что также ведет к неполному проявлению их полезного действия.

В результате гомогенизации существенно изменяются механические свойства слитка. Изменения структуры, вызываемые растворением неравновесных и коагуляцией избыточных фаз, обуславливают значительное повышение пластических характеристик при комнатной температуре и технологической пластичности при деформации. При быстром охлаждении после гомогенизации несколько возрастает и прочность сплава. Гомогенизированные слитки, как правило, требуют меньших удельных давлений и допускают большие скорости деформации чем негомогенизированные.

Изменение структуры слитка после гомогенизации оказывает наследственное влияние на свойства деформированных полуфабрикатов. Пластичность, ударная вязкость, выносливость существенно повышаются. Уровень прочностных характеристик зависит от степени распада твердого раствора с выделением соединений алюминия с марганцем, хромом, цирконием и с другими тугоплавкими элементами с малой растворимостью. Если степень распада достаточно велика, то прочностные характеристики полуфабрикатов, полученных с использованием высоких степеней деформации, несколько снижаются. На уровень прочностных характеристик массивных прессованных полуфабрикатов гомогенизация влияет меньше

1.7 Методы оценки ликвации и степени гомогенности литых сплавов

После проведения гомогенизационного отжига, необходимо провести сравнительный анализ образцов.

По данным полученных результатов по содержанию легирующих элементов по осям дендритов и в междендритных объемах можно в той или иной форме получить сведения о гомогенности или негомогенности сплава.

Критерием гомогенности γ может служить степень приближения составов локальных объёмов литых сплавов к марочному составу. Измерения содержания легирующих элементов удобнее проводить, как показывает опыт, по осям дендритов, которые надёжно выявляются при стандартном травлении для анализа микроструктуры. Дендриты, как правило, обеднены основными легирующими элементами, которые обычно локализованы в междендритных объёмах.

Примем за величину, характеризующую степень негомогенности литого сплава, величину отклонения состава от марочного $\Delta = (q_{\text{среднее}} - q_{\text{марочное}}) / q_{\text{марочное}}$, где $q_{\text{среднее}}$ и $q_{\text{марочное}}$ содержание соответствующих легирующих элементов. Тогда критерий гомогенности можно представить как:

$$\gamma_i = 1 - \Delta$$

Для совершенного гомогенного сплава значение критерия гомогенности должно приближаться к $\gamma_i = 1$.

2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объект исследования

Объектом исследования являются образцы деформируемого алюминиевого сплава Д16 (ГОСТ 4784-97), отобранные равномерно по всей длине слитка, полученные на предприятии ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод».

Химический анализ состава образцов был проведён на предприятии на атомно-эмиссионном методом на спектрометре *Spectrolab* по *ASTM E 1251-11*, а также повторно проведён на растровом микроскопе *JEOL JSM-6460 ULV* с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа при увеличении $\times 50$.



Рисунок 2.1 – Растровый электронный микроскоп *JEOL JSM-6460 ULV*

Результаты анализов химического состава приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав сплава Д16 на цельной отливке после предварительного отжига

Марка сплава	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
Д16	0,1	0,18	4,4	0,6	1,4	0,09	0,07	< 0,01	93,16

Примечание: Выделены концентрации основных легирующих элементов.

Как видно из таблицы, сплав Д16 легирован марганцем, магнием и медью. Введение дополнительных элементов может приводить к суперрадитивному

влиянию на склонность алюминиевых сплавов к проявлению ликвационных эффектов в литых заготовках.

2.2 Пробоподготовка

Выбранные при пробоотборе образцы прошли этап пробоподготовки, включающий в себя следующие стадии:

1) образцы разрезались на отрезном станке *Delta Abrasimet* с водяным охлаждением (рисунок 2.3) на фрагменты.



Рисунок 2.2 – Отрезной станок *Delta Abrasimet*

2) приготовленные фрагменты запрессовывались на прессе для горячей запрессовки *SimpliMet 1000* в пластмассовые таблетки (рисунок 2.4).

3) далее образцы, запрессованные в пластмассу были отшлифованы и отполированы на полуавтоматической шлифовально-полировальной машине *EcoMet 250 + AutoMet 250*.

Таким образом были получены микрошлифы, готовые для структурных исследований.

2.3 Микроструктурные исследования

Исследование микроструктуры образцов проводилось на оптическом инвертированном металлографическом микроскопе *Axio Observer* (Рисунок 2.5), оснащенным программно-аппаратным комплексом для анализа изображений *Thixomet*.

Сначала исследовались полированные микрошлифы, а затем в протравленном состоянии. Травление поверхности микрошлифов с целью выявления микроструктуры металла Реактивом Келлера.



Рисунок 2.3 – Пресс для горячей запрессовки *SimpliMet 1000* и запрессованный образец



Рисунок 2.4 – Полуавтоматическая шлифовально-полировальная машина *EcoMet 250+AutoMet 250* и обрабатываемые образцы



Рисунок 2.5 – Металлографический микроскоп *Axio Observer*

2.4 Проведение гомогенизационного отжига и повторное определение состава образцов

Для проведения гомогенизационного отжига, были назначены четыре режима гомогенизационного отжига, который проводился в печи ПМ-1,0-7 при 555°C в течение 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 8 и 12 часов. После отжига образцы повторно отправляются на исследование составов на растровом микроскопе *JEOL JSM – 6460 ULV*.



Рисунок 2.6 – Электродпечь муфельная лабораторная ПМ-1,0-

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Исследование микроструктуры образцов

Микроструктуры сплава в исходном литом состоянии представлена на рис.3.1

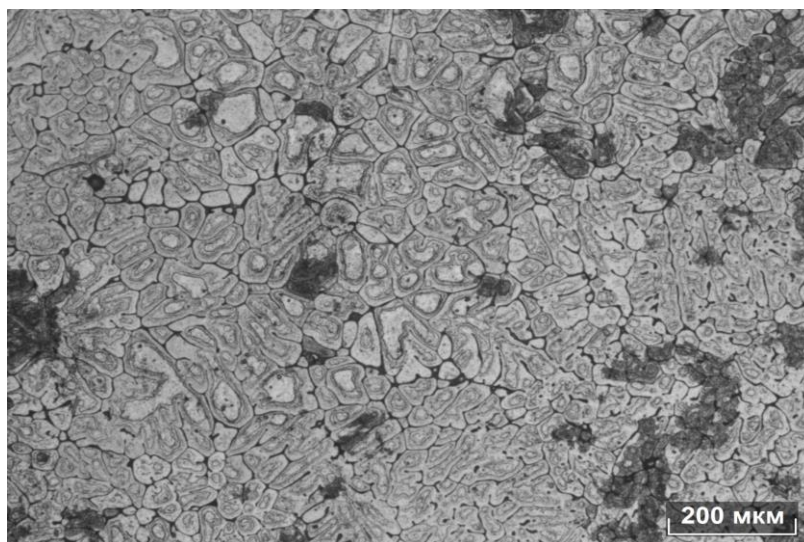


Рисунок 3.1 – Микроструктура литого образца сплава Д16 с помощью оптического микроскопа

Для данного сплава наблюдается типичная, ярко выраженная дендритная структура, характерная для литых алюминиевых сплавов. При микроструктурном исследовании на оптическом микроскопе дендритные оси выглядят светлыми, а междендритные объемы, темные (см. рис.3.1).

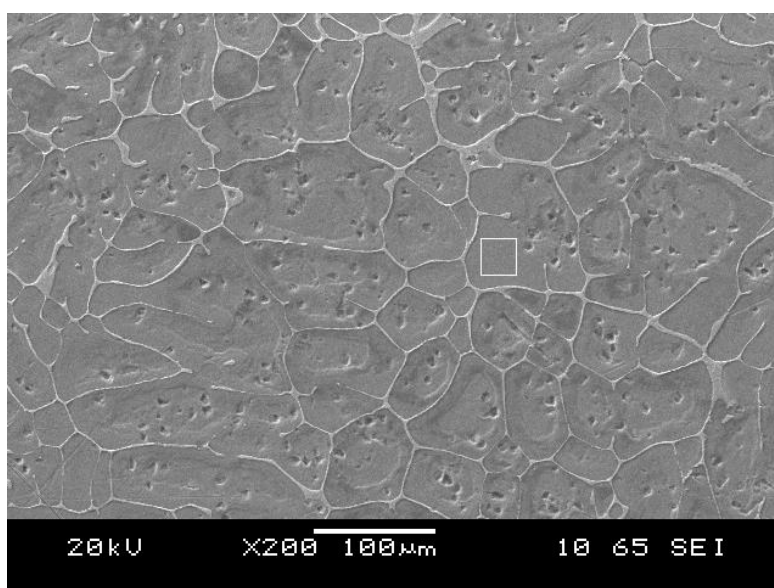


Рис.3.2 - – Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца сплава Д16 с литой структурой

При исследовании на растровом микроскопе цвета инвертируются (рис.3.2). Для определения химического состава осей дендритов и междендридных объемов этих образцов, с целью оценки степени химической неоднородности структуры, проведены систематические исследования на растровом микроскопе. Измерения содержания легирующих элементов лучше проводить по осям дендритов, которые выявляются при травлении для анализа микроструктуры. Дендриты обеднены основными легирующими элементами, которые обычно локализованы в междендридных объемах.

3.2 Оценка химического состава

Оценку степени неомогенности алюминиевых сплавов в литом состоянии, с достаточной степенью доверенности, можно оценивать по результатам измерения отклонения локального состояния сплава от равновесного.

Оценку химического состава локальных областей литого сплава проводили методами микрорентгеноспектрального анализа на растровом микроскопе *JEOL JSM-6460 ULV*. Изображение, полученное на растровом микроскопе представлено на рисунке 3.3, а выделенный квадрат, размерами 30x30 мкм соответствует участку, в котором определен химический состав.

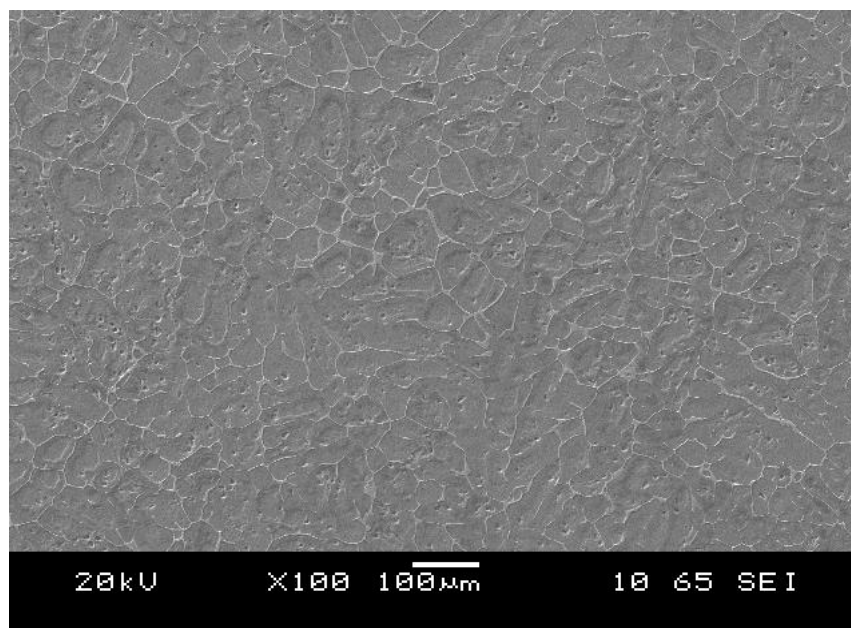


Рисунок 3.3 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца сплава Д16 с литой структурой

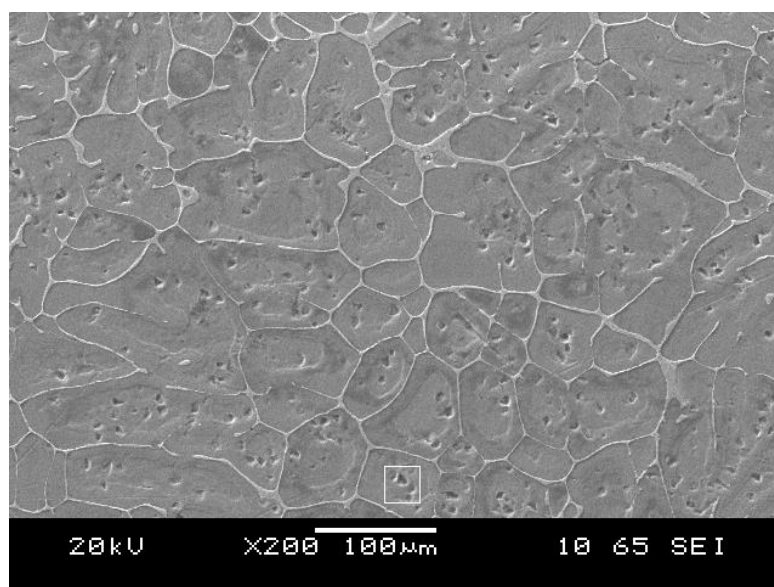


Рисунок 3.4 – Участок на оси дендрита, размером 30x30 мкм, с которого получен спектр 1 и определен химический состав указанный в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Последовательность определений состава сплава Д16 в исходном состоянии по осям дендритов

№	Mg	Al	Mn	Cu
1	0,97	96,43	0,86	1,74
2	0,34	98,45	0,38	0,83
3	0,66	97,98	0,71	0,65
4	0,78	99,02	0,08	0,12
5	0,90	96,85	0,24	2,01
6	0,59	97,71	0,57	1,13
7	0,57	97,26	0,73	1,44
8	0,66	97,40	0,76	1,17
9	0,89	97,79	0,11	1,21
10	0,74	97,59	0,07	1,60
11	0,76	97,06	0,67	1,50
12	0,77	97,44	0,55	1,23
Среднее	0,72	97,61	0,46	1,21

Сравнивая содержание легирующих элементов по осям дендритов и в междендритных объемах, следует отметить значительное несоответствие с марочным составом сплава Д16. Это отклонение, в той или иной форме, может служить мерой неомогенности сплава.

Критерием гомогенности γ может служить степень приближения составов локальных объемов литых сплавов к марочному составу.

За величину, характеризующую степень неомогенности для литого сплава Д16, примем величину отклонения состава от марочного $\Delta = (q_{\text{среднее}} - q_{\text{марачное}}) / q_{\text{марачное}}$, где $q_{\text{среднее}}$ и $q_{\text{марачное}}$ содержание соответствующих легирующих элементов, представленное в таблице 3.1

Рассчитанные значения гомогенности γ_i для основных легирующих элементов для области дендритов: $\gamma_{\text{Mg}}=0,36$; $\gamma_{\text{Cu}}=0,75$; $\gamma_{\text{Mn}}= 0,34$; $\gamma_{\Sigma}=0,493$.

Анализ полученных результатов показывает, что этот подход к количественной оценке степени неомогенности неоднозначен. Полученные критерии гомогенности γ_i для легирующих элементов действительно характеризуют равномерность распределения соответствующего элемента в

матрице и позволяют контролировать процессы гомогенизации при последующем гомогенизирующем отжиге. Но средний коэффициент гомогенности γ_{Σ} , в силу его однозначности, неэффективен для бинарных сплавов, хотя приемлем для сложных многокомпонентных сплавов.

3.3 Оценка состава и структуры сплава после проведения гомогенизационного отжига

Исследование микроструктуры образца после проведения качественного гомогенизационного отжига в печи ПМ-1,0-7 при 530°C показало изменение структуры образцов от ярко выраженной дендритной структуры к намного более равномерной структуре по всей площади образца и предоставлено на рисунках 3.5; 3,6; 3,7; 3,8:

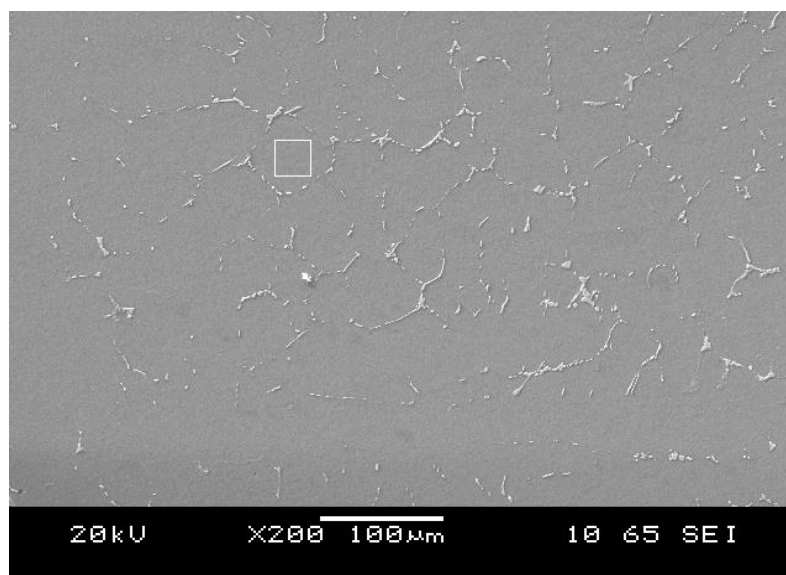


Рисунок 3.5 – Микроструктура образца сплава Д16 после гомогенизационного отжига (2 часа) при увеличении x100

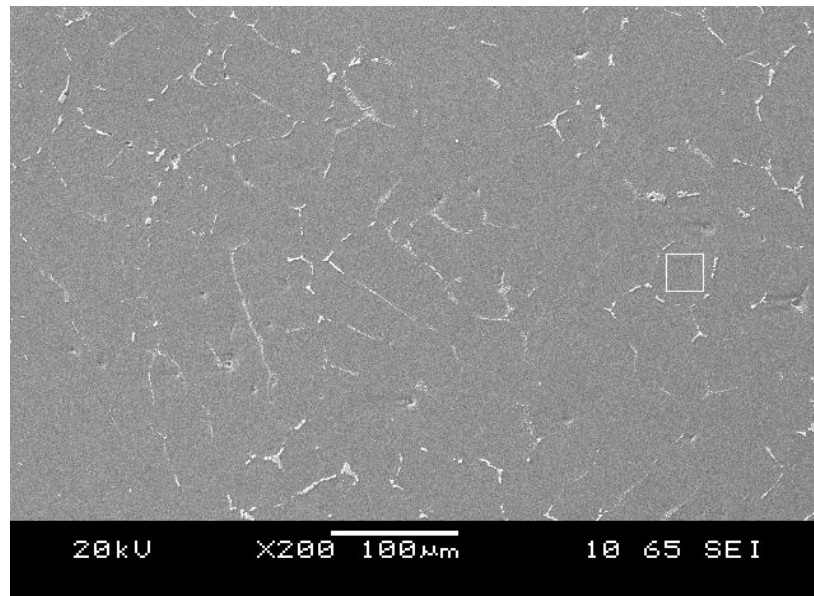


Рисунок 3.6 – Микроструктура образца сплава Д16 после гомогенизационного отжига (4 часа) при увеличении x100

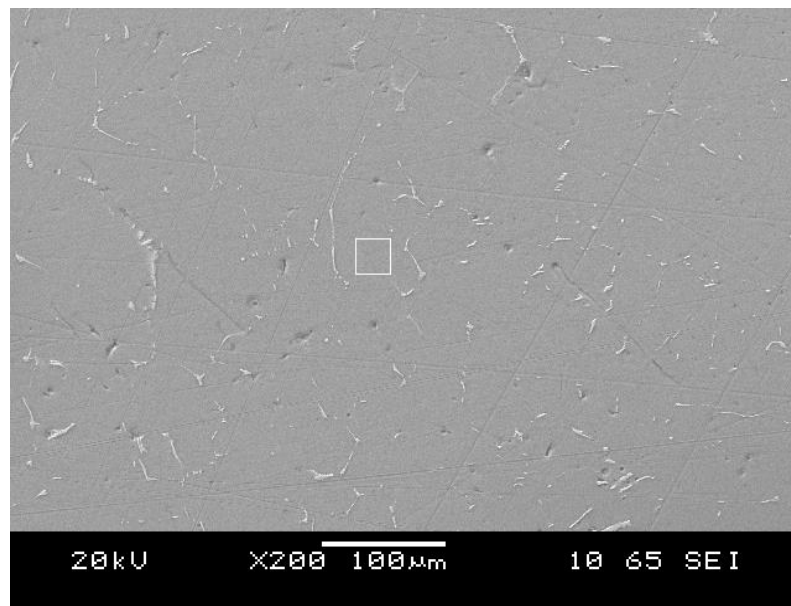


Рисунок 3.7 – Микроструктура образца сплава Д16 после гомогенизационного отжига (8 часов) при увеличении x100

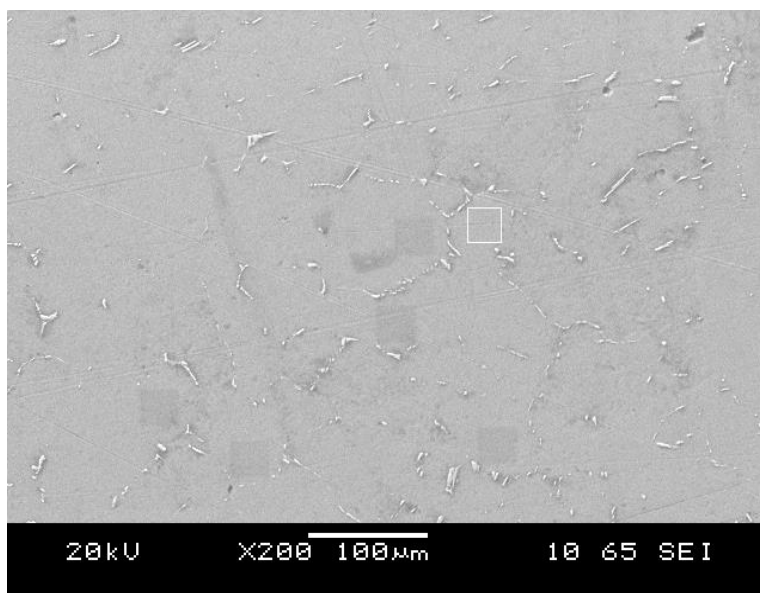


Рисунок 3.11 – Микроструктура образца сплава Д16 после гомогенизационного отжига (12 часов) при увеличении x100

Результаты десяти последовательных определений составов образца после гомогенизационного отжига представлены в таблицах 3.3; 3.4; 3.5; 3.6:

Таблица 3.3 – Химический состав после гомогенизационного отжига (2 часа) сплава Д16

№	Mg	Al	Mn	Cu
1	1,50	97,00	0,23	1,27
2	1,79	96,23	0,38	1,60
3	1,48	97,16	0,21	1,16
4	1,65	96,61	0,16	1,59
5	1,65	96,51	0,26	1,58
6	1,54	96,85	0,22	1,39
7	1,66	96,63	0,26	1,45
8	1,61	96,32	0,27	1,80
9	1,84	96,42	0,28	1,46
10	1,57	96,42	0,29	1,72
11	1,43	96,78	0,26	1,53
12	1,97	96,06	0,33	1,64
Среднее	1,65	96,54	0,27	1,55

Таблица 3.4 – Химический состав после гомогенизационного отжига (4 часа)
сплава Д16

№	Mg	Al	Mn	Cu
1	1,55	96,69	0,27	1,49
2	1,62	96,19	0,35	1,84
3	1,72	96,42	0,35	1,51
4	1,46	96,74	0,14	1,66
5	1,70	96,58	0,23	1,50
6	1,59	96,70	0,38	1,34
7	1,80	96,38	0,19	1,62
8	1,82	96,27	0,29	1,63
9	2,04	96,24	0,29	1,43
10	1,59	96,46	0,23	1,73
11	1,33	96,63	0,31	1,73
12	1,50	96,91	0,18	1,41
Среднее	1,63	96,51	0,27	1,58

Таблица 3.5 – Химический состав после гомогенизационного отжига (8 часов)
сплава Д16

№	Mg	Al	Mn	Cu
1	1,75	96,51	0,25	1,50
2	1,59	96,63	0,25	1,53
3	1,51	96,60	0,33	1,57
4	1,73	96,43	0,29	1,54
5	1,50	96,27	0,37	1,86
6	1,54	96,75	0,25	1,46
7	1,71	96,49	0,26	1,55
8	1,70	96,10	0,33	1,87
9	1,57	96,91	0,25	1,27
10	1,47	96,88	0,20	1,45
11	1,66	96,69	0,29	1,36
12	1,48	96,90	0,25	1,37
Среднее	1,61	96,61	0,27	1,51

Таблица 3.6 – Химический состав после гомогенизационного отжига (12 часов) сплава Д16

№	Mg	Al	Mn	Cu
1	1,48	96,69	0,35	1,49
2	1,52	96,32	0,32	1,84
3	1,66	96,44	0,23	1,68
4	1,77	96,61	0,26	1,36
5	1,45	96,62	0,22	1,72
6	1,53	96,55	0,29	1,62
7	1,47	96,78	0,23	1,52
8	1,49	96,78	0,20	1,53
9	1,52	96,54	0,30	1,64
10	1,72	96,38	0,16	1,74
11	1,40	96,71	0,42	1,47
12	1,62	96,74	0,24	1,40
Среднее	1,56	96,57	0,28	1,58

После изучения полученной структуры, содержание легирующих элементов в центре зёрен и по границам гомогенизированных зёрен выровнялось по всему объёму образца. Локальный состав зёрен в центре и на границах стал близок к марочному составу сплава Д16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована структура и свойства высокопрочного литого деформируемого сплава Д16 в исходном предварительно отожжённом состоянии и после гомогенизационного отжига, на основании чего можно сделать несколько выводов:

- 1) результаты измерений состава локальных участков сплава показали, что для литого состояния характерно значительное несоответствие состава дендритных областей марочному составу,
- 2) результаты измерений состава локальных участков этого же сплава после гомогенизационного отжига указывают на равномерное приближение состава к марочным значениям во всех локальных участках сплава,
- 3) предложенный метод можно рекомендовать в качестве аналитического способа для оценки степени гомогенности алюминиевых литых сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
2. Новиков И.И., Золоторевский В.С. Дендритная ликвация в сплавах. М.: Наука, 1966. 155 с.
3. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А., Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 1999. — 416 с.
4. Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Металлургия, 1986. 544 с.
5. Бродова И.Г., Поленц И.В., Есин В.О. Закономерности формирования литой структуры переохлаждённых сплавов Al-Ti. // ФММ. 1992. №1. - С.84-89.
6. С.-Н. Chang, S.-L. Lee, J.-C. Lin, et al., Effect of Ag content and heat treatment on the stress corrosion of Al-4.6Cu-0.3Mg alloy, Mater. Chem. Phys. 91 (2005) 454-462.
7. D. Xiao, J. Wang, K. Chen, et al., J. Mater, Superplastic deformation of a heat resistant Al; Cu; Mg; Ag, Process. Technol. 209 (2009) 3300—3305.
8. N.Ünlü, B.M. Gamble, G.J. Shiflet, et al., Microstructural evolution of Al-Cu-Mg-Ag alloy during homogenization, Metall. Mater. Trans. A 34 (2003) 2757- 2769.
9. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справ, изд. / М. Б. Альтман, А.Д. Андреев, Г. А. Балахонцев и др. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1983. 352 с.
10. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами.- М.: Металлургия, 1975.- 248 с.
11. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. - М.: Металлургия, 1986, 82 с.
12. Y. Birol, Impact of homogenization on recrystallization of a supersaturated Al-Mn alloy, Scfripa Mater. 60 (2009) 5-8.
13. Y Wu, J.Xiong, R. Lai, et al., The microstructure evolution of an Al-Mg-Si-Mn-Cu-Ce alloy during homogenization, J.Alloys Compd. 475 (2009) 332-338.

14. J.Zhang, R. Zuo, Y. Chen, et al., The microstructure evolution during homogenization of a τ -type Mg-Zn-Al alloy, *J. Alloys Compd.* 448 (2008) 316-320.

15. Золоторевский В.С. Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. - М Металлургия, 1981. 192 с.