Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Заочный факультет Политехнического института
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, начальник отдела

АО «ГРЦ Макеева»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.х.н.,

доцент

Исследование дефектов, возникающих при изготовлении листов и раскатных колец из термически неупрочняемого, деформируемого сплав 01570

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-22.04.02.2020.319 ПЗ ВКР

Консультанты

Начальник сектора

_____П.В. Васильков

Ведущий инженер –
руководитель группы

_____А.В. Иванов

Руководитель проекта

к.т.н., доцент

_____Н.А. Шабурова

Автор проекта

Студент группы ПЗ-343

_____И.О. Андреев

Нормоконтролер

к.т.н., доцент

_____Н.А. Шабурова

Челябинск, 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Андреев И.О. Исследование дефектов, возникающих при изготовлении листов и раскатных колец из термически неупрочняемого, деформируемого сплав 01570. – Челябинск: ЮУрГУ, МиМТ; 2020, 89 с. 51 ил., 14 табл. библиографический список – 24 наим, 55 листов плакатов формата А4.

В работе проведено углубленное исследование материала полуфабрикатов и заготовок из алюминиевых сплавов системы алюминий-магний-скандий.

Проанализирован технологический маршрут производства заготовок и полуфабрикатов на металлургических заводах, с последовательным определением причин, затрудняющих производство данных заготовок.

Определено качество материала листов толщиной 10 мм и раскатных колец из сплава 01570 и установлены причины несоответствия материала. Проведён ультразвуковой контроль, определены механические характеристики, исследованы дефекты, возникающие при изготовлении полуфабрикатов. Проведен подробный металлографический анализ и анализ химического состава в зоне залегания дефектов.

Четко отражены цели и задачи исследований, подробно описаны методики и результаты всех этапов исследований.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности обобщения обнаруженных дефектов, а глубокое всестороннее исследование полуфабрикатов с выявленными дефектами говорит о возможности снятия ограничения на изготовление изделий.

ОГЛАВЕЛНИЕ

Введение.....8
1 Общие сведения об алюминиевых сплавах.....8
1.1 Классификация алюминиевых сплавов.....9
1.2 Деформируемые алюминиевые сплавы.....11
1.3 Сплавы системы Al-Mg легированных скандием.....14
1.4 Области применения сплава 01570.....15
1.5 Термическая обработка алюминиевых сплавов Al-Mg и Al-Mg-Sc...16
1.6 Технологические свойства.....19
2. Технологический процесс изготовления.....20
2.1 Особенности сдаточного контроля раскатных колец.....20
2.2 Материал исследования листов.....22
2.2.1 Особенности входного контроля листов.....24
2.3 Цели исследования раскатных колец.....26
2.3.1 Задачи исследований раскатных колец из сплава 01570……...26
2.3.2 Последовательность исследования раскатных колец……....26
2.4 Методики исследования раскатных колец……..27
2.4.1 Ультразвуковой контроль, разметка и вырезка образцов…….27
2.4.2 Радиографический контроль……....27
2.4.3 Исследование изломов…….27
2.4.4 Исследование макро- и микроструктуры……...28
2.4.5 Механические испытания……29
2.4.6 Материально-техническое обеспечение и место проведения исследования……29
2.5 Методики исследования раскатных колец……..30
2.6 Методика исследования листов толщиной 10 мм……..30
3 Результаты углубленных исследований раскатных колец из сплава 01570……32
3.1 Ультразвуковой контроль раскатных колец……...32

3.2 Радиографический контроль……40

3.3 Исследования изломов……..40

3.4 Исследование макроструктуры……43

3.5 Исследование микроструктуры……45

3.6 Электронноскопическое исследование и микрорентгеноспектральный анализа…….....48

3.7 Определение механических свойств раскатных колец……...61

4. Результаты исследования и анализ листов, толщиной 10 мм из сплава 01570 в отожжённом состоянии……64

4.1 Результаты определения механических свойств……64

4.2 Исследование изломов листов из 01570 в отожженном состоянии..67

4.3 Исследование микроструктуры листов из 01570 в отожженном состоянии……69

Заключение……..84

Библиографический список……86

ВВЕДЕНИЕ

1 Общие сведения об алюминиевых сплавах

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. Кристаллизуется в решетке ГЦК с периодом а = 0,4041 нм (при 20 ° С) и полиморфных превращений не испытывает. Алюминий обладает малой плотностью (2700 кг/м3), низкой температурой плавления (660 ° С), а также высокой электро- и теплопроводностью. Для алюминия характерна высокая пластичность и малая прочность. Основные физико-механические характеристики алюминия приведены в таблице 1, ниже.

Таблица 1 – Характеристики основных физико-механических свойств алюминия

Плотность r , (кг/м^3) · 10^{-3}	2,7
Температура плавления $T_{пл}$, °С	660
Температура кипения $T_{кип}$, °С	2 327
Скрытая теплота плавления, Дж/г	393,6
Теплопроводность l , Вт/м × град (при 20 °С)	228
Теплоемкость C_p, Дж/(г × град) (при 0–100 °С)	0,88
Коэффициент линейного расширения а × 10^6, 1/° С (при 25 °С)	24,3
Удельное электросопротивление r × 10^8, Ом× м (при 20 °С)	2,7
Предел прочности σ$_в$, МПа	40–60
Относительное удлинение δ , %	40–50
Твердость по Бринеллю НВ	25
Модуль нормальной упругости Е , ГПа	70

Алюминий обладает хорошей коррозионной стойкостью в атмосфере и среде многих органических кислот, что обусловлено образованием на его поверхности сплошной тонкой (≈ 5 нм) и плотной оксидной пленки Al_2O_3. В

щелочных средах и некоторых неорганических кислотах алюминий быстро разрушается.

По масштабам производства и потребления алюминий занимает второе место после железа.

В Российской Федерации выпускают первичный алюминий (ГОСТ 11069–74) трех сортов особой чистоты - А999, высокой чистоты – А995–А95, и технической чистоты – А85–А0.

Алюминий особой и высокой чистоты применяется для лабораторных и специальных целей, алюминий технической чистоты – для технических целей (выпуск деформируемого полуфабриката, получения сплавов и др.).

Основные примеси в алюминии – Fe и Si. Железо и кремний практически не растворимы в твердом алюминии и образуют тройные промежуточные фазы a (Fe_2SiAl_6) и b ($FeSiAl_5$), которые приводят к повышению прочности и снижению пластичности.

1.1 Классификация алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы, наряду с сохранением достоинств алюминия, обладают значительно более высокой прочностью и требуемыми эксплуатационно-технологическими характеристиками.

Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Cu, Zn, Mg, Mn, Zr. В условиях равновесия алюминиевые сплавы представляют собой равновесный твердый раствор с выделениями интерметаллидных фаз типа $CuAl_2$ (q-фаза), Al_2CuMg (S-фаза), Al_6CuMg_4 (T-фаза) и др. Помимо основных элементов в сплавы вводят малые добавки Cr, Zr, Ti, Sc, V, Be и некоторые редкоземельные элементы, которые существенно влияют на кинетику распада пересыщенного твердого раствора, на процесс рекристаллизации и размер зерна, на коррозионные и технологические свойства.

Большое влияние на технологические, особенно литейные свойства, в частности на пластичность и склонность к кристаллизационным трещинам, оказывают уровень и соотношение постоянно присутствующих примесей железа

и кремния. При уменьшении содержания этих примесей и, соответственно, количества грубых первичных интерметаллидов в сплавах существенно повышаются характеристики пластичности и вязкости разрушения. Поэтому для техники ответственного назначения, в том числе для авиакосмической, разработаны сплавы с жестким ограничением по примесям, которые в марке имеют обозначение «ч» – чистые; «пч» – повышенной чистоты; «оч» – особой чистоты.

Состав промышленных алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784–19, ГОСТ 1583–93 и др.), структура и свойства изделий из них в значительной степени определяются способом производства. По способу производства алюминиевые сплавы делятся на две основные группы: *деформируемые* и *литейные*.

По способности к упрочнению термической обработкой алюминиевые сплавы подразделяются на *неупрочняемые термообработкой* и *упрочняемые термообработкой* (см. рисунок 1).

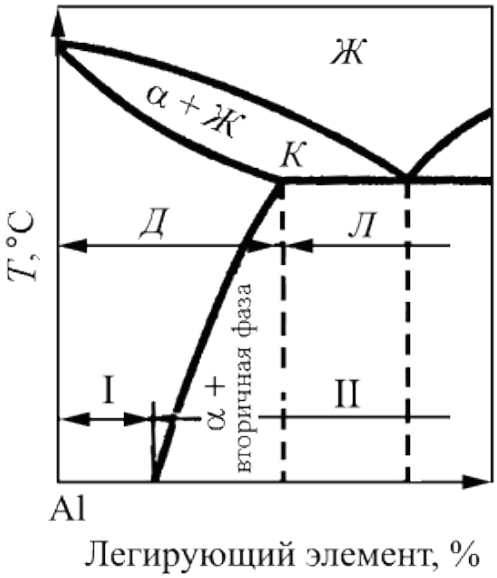

Рисунок 1 – типовая диаграмма состояния сплавов Al – легирующий элемент (схема): *Д* – деформируемые сплавы; *Л* – литейные сплавы; I – сплавы, не упрочняемые термической обработкой; II – сплавы, упрочняемые термической обработкой

В зависимости от уровня прочности, технологических свойств и назначения алюминиевые сплавы разделяют на сплавы высокой, средней и пониженной прочности; ковочные, заклепочные, свариваемые; коррозионностойкие, жаропрочные, криогенные, со специальными физическими свойствами (например, пониженной плотности) и др.

1.2 Деформируемые алюминиевые сплавы

Из деформируемых сплавов методом полунепрерывного литья получают круглые и плоские слитки, которые подвергают горячей и холодной обработке давлением (прессованию, прокатке, ковке, штамповке и др.). Главной структурной составляющей деформируемых сплавов является твердый раствор на основе алюминия, а объемная доля хрупких интерметаллидов сравнительно невелика (не более 10 %), что обеспечивает деформируемость этих сплавов.

Упрочнение деформируемых алюминиевых сплавов, а также изменение физических, технологических, коррозионных свойств достигается с помощью различных методов: нагартовки, термической обработки (закалка + старение), термомеханической обработки (сочетание термической обработки и пластической деформации), закалки из жидкого состояния и упрочнения нерастворимыми частицами оксида алюминия, интерметаллидов и др. (порошковые материалы).

Состояние полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов обозначаются буквенно-цифровой маркировкой (см. таблицу 2).

Упрочнение нагартовкой, повышающее прочностные свойства, применяется особенно широко для термически неупрочняемых сплавов и при термомеханической обработке – для термоупрочняемых сплавов. Сильная нагартовка используется для изделий простой формы (листы, плиты, иногда поковки).

Значительная часть алюминиевых деформируемых сплавов упрочняются термической обработкой: закалкой и естественным (искусственным) старением. Содержание основных легирующих элементов в таких сплавах как правило не

превышает их растворимости в алюминии при высокой температуре. После закалки структура сплавов представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в алюминии. Такая структура, в отличие от закаленных сталей, обладает невысокой прочностью и повышенной пластичностью.

При последующем старении происходит закономерное изменение структуры и свойств сплавов в результате распада пересыщенного раствора с образованием интерметаллидов.

Таблица 2 – Состояния (обработки) полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов

Маркировка	Состояние, назначение
Без ТО	После изготовления, без дополнительной термической обработки. Степень нагартовки и механические свойства не контролируются
ГК	Горячекатаное
ГП	Горячепрессованное
М	Отожженное (мягкое). Наиболее высокая пластичность и стабильность размеров
Н	Нагартованное (холоднодеформированное)
Н4	Усиленно нагартованное (прокаткой листов около 20 %, для максимального упрочнения)
Н3	Нагартованное на три четверти (3/4), повышение прочности
Н2 (П)	Полунагартованное (1/2), повышение прочности
Н1	Нагартованное на одну четверть (1/4), повышение прочности
З	Закаленное* (нестабильное, обычно указывается длительность естественного старения после закалки), повышение прочности
Т	Закаленное + естественно состаренное. Получение достаточно высокой прочности, повышенной пластичности, трещиностойкостии, сопротивления усталости
ТН**	Закаленное + естественно состаренное + нагартованное. На степень деформации нагартовки указывает вторая цифра. Повышение прочности при снижении характеристик пластичности, трещиностойкости
Т1Н**	Закаленное + нагартованное + искусственно состаренное. На степень деформации (нагартовки) указывает вторая цифра. Повышение прочности
Т1Н1**	Закаленное + искусственно состаренное + нагартованное. Повышение прочности особенно при совмещении с процессом формообразования детали

Для всех алюминиевых сплавов этот процесс имеет общие закономерности. На первой стадии старения возникают зоны Гинье – Престона (ГП), в которых в результате повышенной концентрации легирующего элемента наблюдается сильное искажение кристаллической решетки, приводящее к увеличению прочности и твердости. Эта стадия называется стадией зонного старения. При повышении температуры старения (или увеличении его продолжительности при достаточно высокой температуре) возникают частицы метастабильных фаз, когерентно связанных с матрицей твердого раствора, – стадия фазового старения. Затем появляются более крупные частицы метастабильных фаз – стадия коагуляции. В дальнейшем частицы метастабильных фаз обособляются и укрупняются – стадия отжига. При этом искаженность решетки снижается и, следовательно, снижаются прочность и твердость.

Для каждой стадии старения независимо от систем алюминиевых сплавов характерен определенный комплекс свойств. Зонному старению свойственны относительно низкий предел текучести ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$ = 0,6 – 0,7), высокое относительное удлинение (δ > 10 – 15%), высокая коррозионная стойкость, в том числе и стойкость против коррозии под напряжением, высокая вязкость разрушения, низкая чувствительность к трещине.

Для фазового старения характерны высокий предел текучести (σ 0,2/ σ_B = 0,9–0,95), низкая пластичность, пониженные вязкость разрушения, сопротивление коррозии под напряжением и расслаивающей коррозии.

На стадии коагуляции прочностные свойства, достигнув максимума, снижаются, при этом значительно улучшается сопротивление коррозии под напряжением и замедленному разрушению.

Для каждого стареющего алюминиевого сплава имеются свои температурно-временные области зонного и фазового старения. Для сплавов систем Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si, Al–Cu–Mg–Si и Al–Zn–Mg–Cu зонное старение протекает при 20 ° С. Для сплавов системы Al–Zn–Mg при 20 °С наблюдается фазовое старение. Сплавы систем Al–Cu–Li, Al–Mg–Li при 20 ^{O}С практически не

старятся; для осуществления зонного старения их необходимо подогревать. Поэтому термины «естественное старение» и «искусственное старение» следует употреблять только для указания условий старения — без подогрева или с подогревом. Для характеристики структурного состояния и соответствующего ему комплекса свойств надо использовать термины «зонное старение», «фазовое старение» и «коагуляция при старении».

Наиболее важные области алюминиевых сплавов в настоящее время – авиационная и ракетная техника. Высокие удельные характеристики, технологичность, ценовая доступность, изначально определяет выбор конструкторов. Для работы узлов в реальных условиях эксплуатации в космосе необходима также стойкость материалов к воздействию факторов космического пространства: высокого вакуума, перепадов температур, радиации и пр. В настоящее время этим требованиям максимально отвечают алюминиевые деформируемые сплавы, которые и используются наиболее активно.

1.3 Сплавы системы Al-Mg легированных скандием

Al–Mg с добавкой скандия – 01570, 01545, 01535, 01523, 01515. Эти сплавы различаются содержанием магния, которое меняется от 6 до 1 %. Основное отличие этих сплавов от традиционных магналиев – значительно более высокие прочностные характеристики. Самым распространенным является сплав 01570.

Сплав 01570 является термических не упрочняемым, алюминиевым, деформируемым, свариваемым сплавом системы алюминий-магний-скандий.

Сплав защищен патентом РФ №2081934 от 20 июня 1997 г. Он обладает высокой прочностью, удовлетворительной свариваемостью и коррозионной стойкостью. Из сплава изготавливаются прессованные (полоса, прутки, профили), катаные (листы, плиты), кованые, штампованные полуфабрикаты и раскатные кольца.

Все полуфабрикаты имеют более высокие прочностные свойства, чем полуфабрикаты из АМг6.

Пластичность сплава 01570 при всех температурах испытания находится на достаточно высоком уровне. Для изготовления сварных конструкций в качестве присадочного материала используется проволока из сплавов св.АМг6 и св.01570. В конструкциях сплав может использоваться в сочетании со всеми сплавами системы алюминий-магний.

Высокая прочность основного металла полностью реализуется в конструкции при наличии ~30% утолщения свариваемых кромок, получаемых механическим или химическим фрезерованием.

В таблице 3 приведён химический состав сплава 01570, регламентированный ГОСТ 4784-2019.

Таблица 3 – Химический состав, % по массе по ГОСТ 4784-2019

Содержание, % по массе						
Алюминий		Магний		Скандий		Марганец
Основа		5,3 – 6,3		0,17 – 0,27		0,2 – 0,6
Примеси, не более						
Медь	Цинк	Железо	Кремний	Цирконий	Бериллий	Прочие, сумма
0,1	0,1	0,3	0,2	0,05 – 0,15	0,0002 – 0,005	0,15

Содержит дорогостоящий материал – скандий, обеспечивается отечественным сырьем (в виде лигатуры Al-Sc 2 % или 5 % содержания Sc).

1.4 Области применения сплава 01570

Снижение массы средств в авиакосмической отрасли является актуальным направлением повышения массы полезного груза и снижения расхода топлива. В авиационно-космической промышленности широко применяют алюминиевые сплавы. Сплавы рекомендуются для работы при повышенных рабочих температурах и требуемых высоких значениях коэффициента вязкости разрушения, а также для работы при более низких

температурах значительно нагруженных деталей и для деталей с требуемой высокой сопротивляемостью к коррозии под напряжением. В России при изготовлении авиационной техники успешно применяют упрочняемые термической обработкой высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Sc. Они являются конструкционным материалом для опорных и внутренних элементов конструкции.

Сплав 01570 применяться для средне- и высоконагруженных опорных сварных конструкций, работающих в атмосферных условиях. Применяется в авиационной и ракетостроительной промышленности.

Сплав в отожжённом («М») состоянии рекомендуется применять для изготовления герметичных сварных конструкций, работающих при температурах (от минус 196 ^{O}C до 150 ^{O}C). Сплав в нагартованном состоянии («Н») целесообразно использовать для сварных конструкций, работающих при температурах (от 20 ^{O}C до 150 ^{O}C). Достижение высоких прочностных свойств алюминиевых сплавов зачастую идет в ущерб их технологичности.

1.5 Термическая обработка алюминиевых сплавов Al-Mg и Al-Mg-Sc

Полуфабрикаты из сплавов Al–Mg подвергаются только отжигу для снятия нагартовки и перевода их в мягкое отожженное состояние. Кроме того, отжиг как холоднодеформированных, так и горячедеформированных полуфабрикатов с содержанием магния более 5 % повышает их сопротивление расслаивающей коррозии и коррозии под напряжением. Сплавы с более низким содержанием магния обладают высокой устойчивостью против любых видов коррозии как в отожженном, так и в нагартованном состоянии.

Отжиг полуфабрикатов и изделий из магналиев необходимо проводить при температуре 310 – 335 °С в течение 1-2 ч с последующим охлаждением на воздухе. Для сплавов АМг5, АМг6, АМг61, 01570 при охлаждении после отжига необходимо делать выдержку при 250 – 260 °С в течение 1 ч, затем охлаждать с нерегламентированной скоростью. При невозможности осуществления

ступенчатого охлаждения следует вести охлаждение со скоростью не более 30° С/ч.

Сплав 01570 термической обработкой не упрочняется. Единственным видом термической обработки, которому подвергается сплав 01570 для снятия внутренних напряжений, повышения пластичности материала и стабильности размеров является отжиг. Отжиг полуфабриката из сплава 01570 проводится при температуре (320 – 350 ^{O}С). Промежуточные отжиги в случае изготовления деталей методом холодной листовой штамповки целесообразно проводить при температуре 380 ^{O}С не выше, во избежание разупрочнения сплава. Число промежуточных отжигов не регламентируется.

Промышленность выпускает все виды деформированных полуфабрикатов, прежде всего катаные – плиты, листы, ленты, а также прессованные панели, профили, прутки, трубы и кованые – поковки, штамповки. Полуфабрикаты выпускаются в термически необработанном состоянии, после отжига, а некоторые виды полуфабрикатов изготавливаются холодной обработкой давлением (в нагартованном состоянии). Нагартовка повышает прочностные характеристики, особенно предел текучести, но снижает пластичность. Последующая сварка устраняет нагартовку в зоне термического влияния сварного соединения, и механические свойства в указанной зоне соответствуют свойствам в отожженном состоянии.

Гарантируемые механические характеристики полуфабрикатов из промышленных сплавов в различных состояниях представлены в таблице 4 [5].

Деформированные полуфабрикаты из сплавов системы Al—Mg в большинстве случаев имеют рекристаллизованную структуру.

Исключением из этого правила является сплав 01570, легированный скандием и цирконием. Все виды полуфабрикатов из этого сплава имеют нерекристаллизованную (полигонизированную) структуру и благодаря этому обладают повышенными прочностными свойствами.

Таблица 4 – Гарантируемые механические характеристики катаных полуфабрикатов из сплавов системы Al–Mg

Сплав	Состояние	Полуфабрикат	Толщина, мм	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
				МПа		
АМг2	М	Листы	0,5–1,0	165	–	16
			1,0–10,5	65	–	18
	Н2		0,5–1,0	234–15	145	5
			1,0–5,0	234–15	145	6
			5,0–10,0	225	135	6
	Н		0,5–1,0	265	215	3
			1,0–10,5	265	215	4
	ГК, без ТО		5,0–10,5	175	–	7
		Плиты	11,0–25,0	175	–	7
			25,0–80,0	155	–	6
АМг3	М	Листы	0,5–0,6	195	90	15
			0,6–5,5	135	100	15
			4,5–10,5	185	80	15
	Н2		0,5–1,0	245	195	7
			1,0–5,0	245	195	7
			5,5–10,5	235	175	6
	Без ТО		5,0–6,0	185	80	12
			6,0–10,5	185	80	15
	Без ТО	Плиты	11,0–25,0	185	70	12
			25,0–80,0	165	60	11
АМг5	М	Листы	0,5–0,6	275	135	15
			0,6–4,5	275	145	15
			4,5–10,5	275	130	15
	Без ТО		5,0–6,0	275	130	12
			6,0–10,5	275	130	15
		Плиты	11,0–25,0	265	115	13
			25,0–80,0	255	105	12
АМг6	М	Листы	0,5–0,6	305	145	15
			0,6–10,5	315	155	15
	Без ТО		5,0–10,5	315	155	15
		Плиты	11,0–25,0	305	145	11
			25,0–50,0	295	135	6
			50,0–80,0	275	125	4
01570	М	Листы	0,8–2,3	400	270	13
			2,5–4,5	360	240	13
	Н2		0,8–2,3	410	320	6
	Н		0,8–2,3	460	410	4

1.6 Технологические свойства

Листы обладают в отожженном состоянии удовлетворительной штампуемостью, повышение содержания магния не ухудшает этих показателей. Нагартовка заметно снижает штампуемость листов.

Технологическая штампуемость листов сплава 01570 в отожженном состоянии сравнительно низкая и проведение штамповки вызывает определенные трудности. Эта операция может быть заменена пневмоформовкой в состоянии сверхпластичности, которая проявляется при 450–500 ° С в достаточно широком деформационно-скоростном интервале. После сверхпластической деформации прочностные характеристики листов снижаются незначительно.

Сплавы системы Al–Mg обладают хорошей свариваемостью. С повышением содержания магния коэффициент трещинообразования при сварке уменьшается. Однако, в связи с увеличением температурного интервала плавления и повышением концентрации водорода, с ростом содержания магния пористость сварных соединений возрастает.

Сварные соединения этих сплавов ослаблены по сравнению с основным материалом. Это относится к характеристикам прочности, пластичности и стойкости против коррозии. Сварные соединения низколегированных сплавов АМг1, АМг2, АМг3 обладают высокой стойкостью против коррозии. Для повышения коррозионной стойкости сварных соединений сплавов АМг5, АМг6, 01570 полуфабрикаты перед сваркой необходимо подвергать ступенчатому отжигу.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В результате изготовления деталей из полуфабриката раскатанных колец и листов толщиной 10 мм из сплава 01570 для ответственных изделий авиационной промышленности на этапе проведения ультразвукового контроля, выявлен ряд дефектов, ограничивающих дальнейшее изготовление.

Исследование проводили по результатам возникновения дефектов при отработке технологии изготовления материала кольцевых горячекатаных заготовок и листов после проката до толщины 10 мм.

В данной работе проведено исследование дефектов. Габаритные размеры исследованных темплетов методом ультразвукового контроля раскатанных колец и листов 1300х2600мм, и 1600х3500мм соответственно. Листы и кольца поставлены в отожженном состоянии. При изготовлении обнаруживаются многочисленные недопустимые дефекты, эквивалентные плоскодонному искусственному отражателю диаметром 1,5 мм для листов и 1,6 мм для раскатных колец.

При изготовлении раскатных колец из сплава 01570, также выявлено несоответствия механических свойств заданным требования для отрасли.

2.1 Особенности сдаточного контроля раскатных колец

Ультразвуковым контролем систематически выявляются недопустимые дефекты в центральных частях колец, эквивалентные диаметру контрольного отражателя диаметром 1.6 мм (см. рисунок 2). Было приведено металлографическое исследование отобранных проб в полном поперечном сечении. В макроструктуре величина зерна однородная, мелкозернистая, без дефектов в виде пор, разрыхлений и трещин. В микроструктуре до травления на всех шлифах просматриваются выделения избыточных фаз, распределяющихся по сечению неравномерно; ближе к поверхности внутреннего диаметра данные скопления более плотные. Распределение избыточных фаз в основном по границам зёрен.

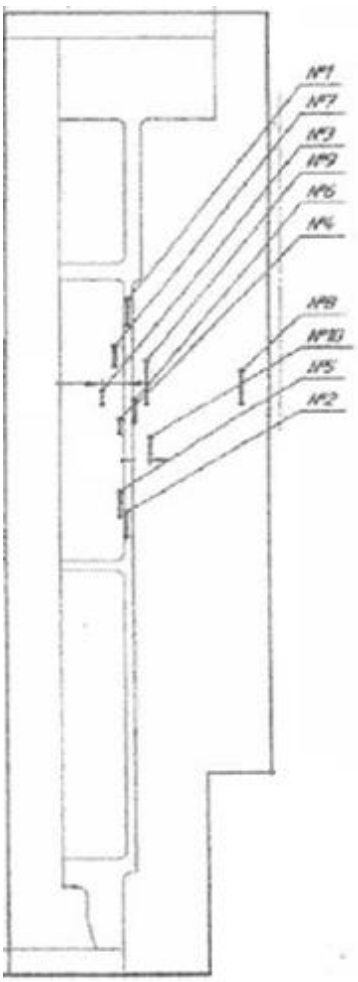

Рисунок 2 – Расположение дефектов по результатам УЗК кольца раскатного.

Исследованию подвергали темплет № 4–2 размерами 108х218х165 мм из обточенной кованой поковки.

Общий технологический маршрут изготовления:

1) Гомогенизация и обточка со снятием с поверхности слоя толщиной 30 мм плоского прямоугольного слитка.

2) Нагрев до температуры 360-380°С.

3) Подсадка слитка, ковка углов, обкатка, прошивка отверстия.

4) Нагрев до температуры 360-380°С.

5) Раскатка на дорне на прессе, подсадка, механическая обработка.

6) Нагрев до температуры 360-380°С.

7) Прокатка №1 на радиально-прокатном стане (РПС).

8) Подогрев заготовки до температуры 360-380°С.

9) Прокатка №2 на РПС до окончательных размеров

10) Отжиг при температуре 310-335°С

11) Отбор образцов для механических испытаний в хордовом (тангенциальном) направлении.

12) Ультразвуковой контроль.

Ультразвуковым контролем систематически выявляются недопустимые дефекты в центральных частях колец, эквивалентные плоскодонному искусственному диаметру контрольного отражателя ∅1,6 мм.

2.2 Материал исследования листов

При неразрушающем методе контроля (ультразвуковом контроле) изготовленных полуфабрикатов выявлены дефекты, находящиеся в образцах размером 60х60 мм. Определены глубина и протяженность дефектов. Перечень образцов с описанием дефектов приведён в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень образцов

Номер образца	Партия, номер листа, номер дефекта	Глубина залегания дефекта (относительно лицевой поверхности листа), мм	Условная протяженность, мм
3	2341, 3, 4	8,5-9,5	6,0
13	2341, 13, 3	2,5-2,7	21,0
17	2341, 17, 2	8,5-9,8	4,0
23	2341, 23, 4	7,0-7,2	10,0
25	2341, 25, 4	6,5-6,7	8,0

В образце №3 дефект ориентирован под углом к поверхности ввода (лицевая поверхность листа), в образцах №№13, 17, 25 дефекты распознаются как объемные, а судя по многочисленным пикам эхосигналов, вероятно наличие нескольких близкорасположенных дефектов. Все обнаруженные дефекты вытянуты вдоль направления проката.

При сдаточном контроле проводился 100% контроль механических свойств на соответствие требованиям нормативно-технической документации и автоматизированный ультразвуковой контроль (УЗК).

Механические свойства определялись в соответствии с ГОСТ 1497-84 на пропорциональных плоских образцах тип 1 № 10.

Механические свойства определяли на темплетах листов размером 10х170х500 мм и на заготовках размером 10х20х120 мм, оставшихся после испытаний. Перечень образцов, подверженных механическим испытаниям, а также результаты испытаний приведены в таблице 6. Все листы удовлетворяют заданным требованиям.

Таблица 6 – Механические свойства листов из сплава 01570 10х1300х2600 мм в поперечном направлении, определенные при сдаточном контроле.

№ листа	$\sigma_в$		$\sigma_{0,2}$		δ, %
	кгс/мм^2	МПа	кгс/мм^2	МПа	
1	42,0	412	30,0	294	15,4
2	41,7	409	29,3	287	20,2
3	41,8	410	29,1	285	15,4
4	41,3	405	29,2	286	16,2
5	41,6	408	29,3	287	15,5
6	41,4	406	29,6	290	16,1
7	41,8	410	29,2	286	15,8
8	41,3	405	29,3	287	15,1
9	41,3	405	29,1	285	17,4
11	41,8	410	30,3	297	21,2
12	41,3	405	29,3	287	15,8
13	41,3	405	29,4	288	15,1
14	41,7	409	29,6	290	16,5

продолжение таблицы 6

№ листа	$\sigma_в$		$\sigma_{0,2}$		δ, %
	кгс/мм^2	МПа	кгс/мм^2	МПа	
15	41,2	404	30,2	296	16,1
16	41,2	404	29,3	287	15,8
17	41,3	405	29,2	286	16,2
18	41,2	404	29,3	287	16,7
19	41,5	407	29,6	290	16,7
22	41,5	407	30,1	295	16,4
23	41,3	405	30,0	294	16,4
25	41,1	403	29,7	291	17,2
26	41,4	406	29,6	290	15,9
27	41,6	408	29,7	291	17,1
28	41,4	406	29,9	293	16,7
29	41,5	407	29,9	293	16,8
30	41,6	408	30,2	296	18,2
Среднее	41,5	407	29,6	290	16,6
мин	41,1	403	29,1	285	15,1
Примечание: Механические свойства определялись в отожженном состоянии по ГОСТ 1497-84 на плоских образцах с начальной расчетной длиной $l_0 = 5{,}65\sqrt{F_0}$ (100 мм) (по одному образцу для каждого листа)					

При УЗК выявляли дефекты, сигнал от которых эквивалентен или превышает сигнал от искусственного плоскодонного отражателя диаметром 1,5 мм, выполненного на половину толщины образца. В партиях УЗК выявлены недопустимые внутренние дефекты. Поскольку обнаруженные дефекты позволяли изготовить одну годную деталь (листы раскраиваются на несколько заготовок), листы были сданы в работу.

2.2.1 Особенности входного контроля листов

При входном контроле проводился 100% контроль механических свойств на соответствие требованиям нормативно-технической документации и УЗК в соответствии с требованиями.

Механические свойства определялись в соответствии с ГОСТ 1497-84 на цилиндрических образцах тип III № 7. На ряде образцов получены значения

относительного удлинения, не соответствующие требованиям. Результаты контроля механических свойств листов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Механические свойства листов из сплава 01570 10х1300х2600мм в поперечном направлении, определенные при входном контроле.

№ листа	$\sigma_в$		$\sigma_{0,2}$		δ, %
	кгс/мм^2	МПа	кгс/мм^2	МПа	
1	43,0 49,0	422 481	36,5 37,0	358 363	16,4 16,0
2	47,5 44,5	466 437	35,5 37,0	348 363	14,4 14,4
3	43,5 47,5	427 466	39,0 38,0	383 373	14,6 13,2
5	47,0 43,0	461 422	33,5 39,0	329 383	16,5 15,0
7	43,0 44,0	422 432	37,0 36,0	363 353	13,6 16,0
8	46,0 48,0	451 471	32,5 34,0	319 334	15,6 18,4
9	43,5 43,0	427 422	38,0 38,0	373 373	11,0 12,0
11	44,0 43,0	432 422	35,0 35,5	343 348	13,6 16,0
13	47,0 47,0	461 461	38,0 38,0	373 373	15,0 16,0
14	43,0 44,5	422 437	38,5 39,0	378 383	12,0 11,5
18	48,0	471	38,0	373	16,0
19	41,0 43,5	402 427	36,0 38,0	353 373	18,0 18,6
22	43,0 43,0	422 422	38,0 38,0	373 373	15,0 15,0
25	43,0 44,0	422 432	37,0 37,5	363 368	14,4 13,0
26	43,0 43,0	422 422	36,0 37,0	353 363	15,0 15,0
27	44,0 44,0	432 432	38,0 38,5	373 378	10,0 12,4
28	41,0 43,0	402 422	38,0 34,0	373 334	13,0 11,0
30	46,0 46,0	451 451	41,0 40,0	402 392	11,0 15,0
Среднее мин	44,5 41,0	436 402	37,1 32,5	364 319	14,4 10,0

Настройка чувствительности дефектоскопа при УЗК производилась на образце с искусственным плоскодонным отражателем диаметром 1 мм, выполненным на половину толщины образца. При УЗК практически на всех листах партии выявлены внутренние дефекты, не соответствующие требованиям технических условий.

Для исследования характера и природы обнаруженных дефектов из 5 листов вырезаны образцы размером 60х60 мм. Для контроля механических свойств были переданы заготовки размером 20х120 мм, оставшиеся после вырезки образцов.

2.3 Цели исследования раскатных колец

Цель работы исследования раскатных колец заключается в определении качества материала колец из сплава 01570, установление причин несоответствия механических свойств.

2.3.1 Задачи исследований раскатных колец из сплава 01570

2.3.1.1 Ультразвуковой контроль темплета с целью подтверждения обнаруженных дефектов и точного определения глубины их залегания в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

2.3.1.2 Определение вероятной причины возникновения дефектов, оценка влияния дефектов на свойства колец.

2.3.2 Последовательность исследования раскатных колец

2.3.2.1 Ультразвуковой контроль темплета с целью подтверждения и точного определения залегания дефектов.

2.3.2.2 Радиографический контроль темплета с целью выявления внутренних дефектов.

2.3.2.3 Проведение металлографических исследований материала в зоне обнаруженных УЗК дефектов.

2.3.2.4 Вскрытие дефектов, фрактографический анализ изломов в зоне дефектов.

2.3.2.5 Определение механических свойств материала в зоне дефектов, фрактографический анализ изломов образцов после механических испытаний.

2.3.2.6 Микрорентгеноспектральный анализ изломов и участков с выявленными УЗК дефектами.

2.4 Методики исследования раскатных колец

2.4.1 Ультразвуковой контроль, разметка и вырезка образцов

Ультразвуковой контроль проводился эхометодом в контактном варианте акустического контакта. Чувствительность контроля настраивалась по образцам КСО-2 ГОСТ 21397, содержащим плоскодонные искусственные отражатели диаметром 1,6 мм.

2.4.2 Радиографический контроль

После разрезки все части темплета с выявленными УЗК дефектами подвергались радиографическому контролю.

Контроль проводили на образцах толщиной 30 мм и 5 мм. Минимальный размер неметаллического включения или пустоты в направлении просвечивания, которые может обнаружить радиографический контроль на образцах данной толщины составляет 2% от толщины образца.

2.4.3 Исследование изломов

Изломы получали ударным способом при максимальном приближении к координатам дефекта УЗК. Для сравнения аналогичным способом изготавливали изломы из металла без дефектов УЗК. Исследовали также изломы разрывных образцов.

Исследование проводили методами оптической и электронной микроскопии.

Исследовали образцы после механических испытаний на разрыв (№№ 2,

3, 4), изломы в зоне предполагаемых дефектов (№№ 5, 6), микрошлифы вырезанных из зон с предполагаемыми дефектами (образцы №№ 3-2-1, 3-2-3) и свободных от дефектов участков (образцы №№3, 2).

Исследование методами растровой электронной микроскопии образцов, вырезанных из зон с дефектами, обнаруженными при ультразвуковом контроле, фрактографический анализ поверхностей разрушения.

Химический состав определяли методом микрорентгеноспектрального анализа при помощи рентгеновского энергодисперсионного микроанализатора INCA ENERGY 450 на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II XMU. Рельеф поверхности разрушения образцов после механических испытаний исследовали на растровом электронном микроскопе Tescan Vega II XMU и описывали с использованием терминов и основных понятий фрактографического анализа РД 50 - 672-88.

2.4.4 Исследование макро- и микроструктуры

Для выявления макроструктуры применяли реактивы следующих составов:

Состав №1:

HNO_3 – 45% HF-15% H_2O - 40%

Состав №2:

HCL – 60 см^3 H_2O-60 см^3 $CuSO_4$-12 г

Макроструктуру исследовали при увеличении до 32 крат.

Микроструктуру исследовали при увеличении до 500 крат на механически полированных шлифах до и после травления в реактиве Келлера, а также на электрополированных шлифах.

Электрополирование производилось при напряжении 20В и плотности тока 2,5-5 А/см^2, материал катода - нержавеющая сталь. В качестве электролита применялся реактив следующего состава:

Ортофосфорная кислота (H_3PO_4) - 360 мл;

Серная кислота (H_2SO_4) - 70 мл;

Дистиллированная вода (H_2O) - 20 мл;

Хромовый ангидрид (CrO_3) - 20 г.

2.4.5 Механические испытания

Механические свойства ($\sigma_в$, σ_{02}, δ) определяли при растяжении цилиндрических образцов по ГОСТ 1497-84 со скоростью нагружения 2 мм/мин. Масштаб диаграммы не менее 100:1. Образцы изготовлены в радиальном и хордовом направлениях (4 образца изготовлены из участков без дефектов УЗК, 2 образца изготовлены из участков с дефектами УЗК). Тип образца - III №7 ГОСТ 1497-84.

2.4.6 Материально-техническое обеспечение

Для проведения исследования было использовано:

- микроскоп оптический бинокулярный МБС-10;
- микроскоп оптический бинокулярный МСП-1;
- микроскоп оптический Olympus BX-51M;
- испытательная машина Instron;
- ультразвуковые дефектоскопы A1214 Expert, Al550 IntroVisor;
- шлифовальный станок «NERIS»;
- сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega

2.5 Цели исследования листов

Цель работы исследования листов заключается в определении качества материала, установление причин несоответствия механических свойств.

2.5.1 Определение механических свойств материала листов;

2.5.2 Вскрытие и исследование дефектов в изломах;

2.5.3 Металлографические исследования дефектов на шлифах;

2.5.4 Анализ химического состава материала листов в зоне дефектов.

2.6 Методика исследования листов толщиной 10 мм

2.6.1 Механические характеристики ($\sigma_в$, σ_{02}, δ) листов определяли при растяжении в статическом режиме нагружения при комнатной температуре - по

ГОСТ 1497-84 на испытательной машине «LF-600» (скорость нагружения 2 мм/мин, погрешность испытательной машины по нагрузке ±0,5%). Механические характеристики определялись на пропорциональных цилиндрических образцах тип III №7 ГОСТ 1497-84.

Согласно ГОСТ 1497-84 относительное удлинение образца после разрыва (δ) в процентах вычисляли по формуле

$$\delta = \frac{(l - l_0) \cdot 100}{l_0},$$

Перед испытанием на рабочую часть образца наносятся метки, расстояние между которыми l_0, после испытаний половинки образца плотно совмещают и замеряют расстояние между метками – l. Относительное удлинение определялось на образцах с расчетной длиной $l_0=5d_0$

Также в ГОСТ 1497-84 определено понятие равномерного относительного удлинения $\delta_р$, которое вычисляется путем исключения из расчета зоны неравномерной деформации в близи излома. Равномерное относительное удлинение определяется только на образцах с расчетной длиной не менее $l_0 = 11{,}3\sqrt{F_0}$.

Использование небольших образцов требует более тщательной разметки базы (25 мм) и замеров удлинения после разрыва, поэтому дополнительно для точного определения пластических характеристик в процессе испытаний деформация образца регистрировалась с помощью автоматического тензометра MFL на базе 10 мм. Размер базы обусловлен геометрией используемого образца и конструктивными особенностями тензометра.

2.6.2 Для исследования дефектов в изломах производилось их вскрытие следующим образом:

- на образце № 13 делался надрез вокруг дефекта параллельно поверхности листа, затем с помощью клина образец разламывался на две части;

- на образце № 17 делалось два надреза с противоположных сторон параллельно торцевым граням образца до предполагаемой зоны расположения дефекта, затем с помощью клина образец разламывался на две части.

Для определения исходных размеров дефектов изготавливались шлифы и исследовалась микроструктура:

- на образце № 23 в сечении, расположенном вдоль дефекта;

- на образце № 3 в двух поперечных по отношению к дефекту сечениях.

Изломы исследовались с помощью лупы трехкратного увеличения и микроскопа МБС-10 при увеличении 10-56 крат.

2.6.3 Микроструктура материала исследовалась на шлифах в нетравленном состоянии, а также после электрополирования.

Электрополирование производилось при напряжении 35-40В и плотности тока 2,5-5 А/см^2, материал катода – нержавеющая сталь. В качестве электролита применялся реактив следующего состава:

Ортофосфорная кислота (H_3PO_4) – 360 мл;

Серная кислота (H_2SO_4) – 70 мл;

Дистиллированная вода (H_2O) - 20 мл;

Хромовый ангидрид (CrO_3) – 20 г.

Исследование микроструктуры проводили на микроскопе «OLYMPUS BX51M» при увеличении до 500 крат.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ УГЛУБЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСКАТНЫХ КОЛЕЦ ИЗ СПЛАВА 01570

3.1 Ультразвуковой контроль раскатных колец

Ультразвуковой контроль темплета кольца на частоте 2,5 МГц подтвердил наличие эхосигналов от предполагаемых внутренних дефектов. Была выявлена область с множественными эхосигналами в зоне контроля. В данной области определены 5 несплошностей с отражающей способностью эквивалентной плоскодонному искусственному отражателю диаметром 1,6 мм.

Координаты залегания дефектов указаны на рисунках 3.1 – 3.5.

Ультразвуковой контроль на частоте 4,0 МГц участков с дефектами, выявленными при контроле на частоте 2,5 МГц, не подтвердил наличие несплошностей с отражающей способностью эквивалентной плоскодонному искусственному отражателю диаметром 1,6 мм (см. рисунки 3.6 – 3.10) множественных эхосигналов.

Согласно местоположению предполагаемых дефектов, на исследуемый темплет была нанесена разметка для его разрезки на части. По разметке УЗК вырезаны образцы для проведения исследований (см. рисунок 4.1).

Для уточнения координат дефектов после разрезки части темплета повторно подвергли УЗК на частоте 2,5 МГц (см. рисунок 4.2). Перед повторным УЗК поверхность фрезерована.

По разметке УЗК вырезали образцы для изготовления изломов, шлифов и цилиндрических образцов для испытаний на растяжение.

3.2 Радиографический контроль

Результаты просвечивания приведены в таблице 8. Проведенный контроль образцов не выявил неметаллических включений и пустот размером более 0,1 мм (в пределах разрешения метода контроля).

Таблица 8 – Результаты радиографического контроля

Тип образца	Обозначение образца, №	Результаты просвечивания
Исходный	1-1	Дефектов не обнаружено
	1-2	
	2-1	
	2-2	
	3-1	
	3-2	
	4-1	
	4-2	
	5-1	
	5-2	
После предварительной механической обработки	2-1	Дефектов не обнаружено
	2-2	
	4-1	
	4-2	
	5-1	
	5-2	
После повторной механической обработки	2-1	Дефектов не обнаружено
	2-2	
	4-1	
	4-2	
	5-1	
	5-2	

3.3 Исследования изломов

Поверхность исследованных изломов, изготовленных из участков без дефектов УЗК, матовая (вследствие вытягивания волокон перед разрушением), шероховатая, рельеф «ямочный», что свидетельствует о предшествующей

разрушению пластической деформации и вязком разрушении материала раскатанного кольца.

При исследовании изломов, изготовленных из мест с дефектами УЗК, установлено:

- поверхность изломов шероховатая;
- на границах некоторых «ямок» наблюдаются вертикальные участки разрушения со значительно более гладкой поверхностью, и трещины, уходящие под поверхность разрушения и являющиеся продолжением этих вертикальных участков. Образование участков связано с ослаблением границ зерен вследствие структурной неоднородности материала;
- в изломе, выполненном в радиально-осевой плоскости, наблюдается «ступенька» по всей длине излома (25 мм) с нечетко выраженными границами. Образование такой ступеньки может быть следствием плохого сцепления соседних волокон при деформации.
- поверхность всех изломов матовая, что свидетельствует о пластической деформации волокон перед разрушением и об отсутствии хрупкой составляющей в изломах.

Внешний вид изломов разрывных образцов, изготовленных из участков без дефекта УЗК из участков с дефектом УЗК приведен на рисунке 1.

Исследование изломов четырех разрывных образцов, изготовленных из участков без дефектов УЗК, показало:

1 Изломы трех разрывных образцов, изготовленных в радиальном направлении (1 образец) и в хордовом направлении (2 образца), косые, разрушение произошло по направлению действия главных касательных напряжений (под углом 45° к направлению действия максимальных растягивающих напряжений), путем среза. Поверхность изломов матовая. Такое разрушение является вязким и характерно для изломов разрывных образцов из сплава 01570.

2 Поверхность излома одного образца, вырезанного в радиальном направлении, расположена, в основном, под углом 90° к оси образца, что

свидетельствует о разрушении отрывом под действием нормальных напряжений. Поверхность изломов матовая, что свидетельствует о деформации зерен перед разрушением. Такое разрушение можно характеризовать как малопластичное.

3 Поверхности изломов двух разрывных образцов, вырезанных из участков с дефектами УЗК, расположены, в основном, под углом 90° к оси образца, что предполагает разрушение под действием нормальных напряжений. Поверхность всех изломов матовая, что свидетельствует о предшествующей разрушению пластической деформации. Разрушение малопластичное.

4 Неметаллических включений и окисных плен на поверхности исследованных изломов не обнаружено, качество материала по неметаллическим включениям соответствует заданным требованиям.

3.4 Исследование макроструктуры

Макроструктура материала раскатанного кольца сплава 01570 в отожженном состоянии после травления в реактивах составов 1 и 2 представлена на рисунках 5.2 – 5.4.

В результате травления в реактиве 1 (плоскость «Л» травления по всему сечению, рисунок 4.1 и рисунок 5.2) выявляется пористость в средней части кольца с размерами раковин до 0,6 х 0,1 мм, образование которой можно объяснить химической неоднородностью данной части кольца. Макроструктура наружной части кольца после травления в данном реактиве плотная.

Преимущество реактива 2 в хорошем выявлении зерна (макроструктура мелкозернистая). После травления в этом реактиве наблюдаются мелкие раковины равномерно по толщине кольца.

Неметаллических включений и окисных плен на поверхности макрошлифов не наблюдается. Качество материала по данным дефектам соответствует заданным требованиям к материалу.

3.5 Исследование микроструктуры

Микроструктура материала раскатанного кольца приведена на рисунках 6.1 – 6.3

В микроструктуре наблюдаются мелкие слабодеформированные в хордовом направлении зерна с выделениями дисперсных интерметаллидов, в основном, по границам зерна, а также первичные интерметаллиды размером до 0,025 мм.

Неметаллических включений и окисных плен на поверхности микрошлифов не наблюдается. В участках с дефектами УЗК на травленых и электрополированных шлифах наблюдаются раковины размером до 0,1х0,02 мм, являющиеся, предположительно, пустотами от выкрошившихся интерметаллидов, а также темные нитевидные выделения по границам зерна, являющиеся, очевидно, нерастворившейся эвтектикой (остатками от литой структуры), что свидетельствует о недостаточной проработке материала в средней части по толщине кольца.

3.6 Электронноскопическое исследование и микрорентгеноспектральный анализа

Исследование шлифов показало наличие интерметаллидов систем Al-Mn-Fe, Al-Mg и Al-Sc размерами до 30 мкм (см. рисунок 7.1). Кроме того, на всех шлифах были обнаружены углубления размером от 5 до 500 мкм, заполненные оксидом хрома Cr_2O_3 (см. рисунок 7.2), использованном при полировке исследуемых образцов, применявшимся для приготовления шлифов. Некоторые из углублений заполнены остатками интерметаллидов (см. рисунки 7.3 и 7.4), что свидетельствует о том, что данные дефекты были образованы при полировке за счет «отрыва» интерметаллидов. Окисных плен, неметаллических включений, других дефектов металлургического характера не выявлено.

Анализ поверхностей разрушения после механических испытаний показал, что все образцы разрушились по механизму вязкого излома. Небольшая высота ямок и наличие большого числа гладких поверхностей говорит о высокой работе при разрушении и интенсивной сдвиговой деформации. Характерное волокнисто- полосчатое строение (см. рисунок 7.9 а, б) поверхностей излома говорит о деформированности материала. На дне некоторых ямок были обнаружены интерметаллиды систем Al-Mn-Fe и Al-Mg (см. рисунки 7.10, 7.11), размер которых не превышает 25 мкм, пор и неметаллических включений на поверхности разрушения обнаружено не было.

Исследование показало отсутствие пор и неметаллических включений различного рода. Обнаруженные на шлифах неровности представляют собой углубления от выкрошившихся в процессе пробоподготовки цепочек интерметаллидов систем Al-Mn-Fe, Al-Mn и Al-Sc.

Исследование изломов показало, что материал разрушается по вязкому механизму разрушения с участками ямочного излома.

Исследование шлифов и поверхностей разрушения показало отсутствие пор и неметаллических включений различного рода. Обнаруженные на шлифах углубления представляют собой выкрошившиеся в процессе пробоподготовки интерметаллиды систем Al-Mn-Fe, Al-Mg и Al-Sc.

Исследование изломов показало, что материал разрушается по вязкому механизму разрушения с участками ямочного излома. О деформированности материала говорит характерное волокнисто-полосчатое строение поверхности разрушения, на дне некоторых ямок присутствуют интерметаллиды систем Al-Mn- Fe и Al-Mg.

3.8 Определение механических свойств раскатных колец

Механические свойства материала раскатанного кольца из сплава 01570М в различных направлениях в участках без дефектов и с дефектами УЗК, эквивалентными контрольному отражателю диаметром 1,6 мм, приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Механические свойства материала раскатанного кольца из сплава 01570 в отожженном состоянии

№ образца	Место вырезки	Направление вырезки	Механические свойства		
			$\sigma_в$, кгс/мм^2	σ_{02}, кгс/мм^2	δ, %
4-1	Дефект УЗК	радиальное	29,4	22,1	5Л
4-2	Дефект УЗК	радиальное	31,4	22,4	6,5
М2-1	Без дефекта УЗК	радиальное	33,5	22,8	7,8
М2-2	Без дефекта УЗК	радиальное	36,9	23,5	11,3
М2-3*	Без дефекта УЗК	хордовое	42,1	25,5	21,4
М2-4	Без дефекта УЗК	хордовое	39,9	25,5	21,4
Требования нормативно-технической документации		хордовое	36,0	23,0	11,0
		хордовое, осевое	36,0	23,0	11,0
		радиальное	34,0	22,0	9,0

Из таблицы 9 следует:

1 Механические свойства материала раскатанного кольца в хордовом направлении вырезки в участках без дефектов УЗК соответствуют заданным требованиям.

2 Механические свойства в радиальном направлении вырезки в участке без дефектов соответствует требованиям по результатам испытаний одного образца, по результатам испытаний второго образца механические свойства не соответствуют заданным требованиям: $\sigma_в$ - на 0,5 кгс/мм^2, σ_{02} — на 0,2 кгс/мм^2, δ - на 1,2%.

3 Механические свойства в радиальном направлении волокна в участках с дефектами УЗК соответствуют требованиям по характеристике σ_{02}, но не соответствуют требованиям по характеристикам $\sigma_в$ - на 2,6 - 4,6 кгс/мм^2, δ - на 2,5-3,9%.

Анализ результатов

1 Ультразвуковой контроль на частоте 2,5 МГц приводит к суммированию эхосигналов структурных шумов и к фиксации ложных эхосигналов с амплитудой эквивалентной плоскодонному искуственному отражателю диаметром 1,6 мм. Ультразвуковой контроль на частоте 4,0 МГц позволяет снизить количество ложных эхосигналов.

Амплитуда структурных шумов в сплаве 01570М существенно отличается от амплитуды структурных шумов в сплаве Д16Т, из которого изготовлены настроечные образцы комплекта КСО-2. Высокий уровень структурных шумов не позволяет с высокой достоверностью отличать эхосигналы от несплошностей и ложных эхосигналов.

3 При радиографичеком контроле материала образцов, изготовленных из участков с предполагаемыми дефектами УЗК, дефектов не обнаружено.

4 Изломы раскатанного кольца в участках без дефектов УЗК - пластичные (вязкие), в участках с дефектами УЗК - малопластичные.

5 В структуре средних участков темплета после травления наблюдаются пористость, образование которой может быть связано как с выкрашиванием интерметаллических включений, так и структурной неоднороностью по сечению. Размер раковин не превышает 0,5 мм. В структуре наружных участков кольца пористости не наблюдается. По неметаллическим включениям качество материала соответствует требованиям.

6Механические свойства материала раскатанного кольца в хордовом направлении волокна в участках без дефектов УЗК соответствуют требованиям технических условий.

7 Механические свойства в радиальном направлении волокна в участках с дефектами УЗК соответствуют требованиям по характеристике σ_{02}, но не соответствуют требованиям по характеристикам $\sigma_в$ - на 2,6 - 4,6 кгс/мм^2, δ -на 2,5 - 3,9%.

Снижение механических свойств в участках с дефектами УЗК (средняя часть кольца) может быть связано с недостаточной проработкой структуры в данной части кольца.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ЛИСТОВ, ТОЛЩИНОЙ 10 ММ ИЗ СПЛАВА 01570 В ОТОЖЖЁННОМ СОСТОЯНИИ

4.1 Результаты определения механических свойств

Результаты определения механических свойств приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Механические свойства материала листов из сплава 01570

Номер партии, листа	Номер образца	σ_B, МПа			$\sigma_{0.2}$, МПа			δ, %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
2341, 9	11 12 Среднее	427 428 **428**	405	427 422 **424**	294 289 **292**	285	373 373 **373**	22,4 17,2 **19,8**	17,4	11,0 12,0 **11,5**
2341, 27	21 22 Среднее	421 425 **423**	408	432 432 **432**	283 281 **282**	291	373 378 **375**	18,8 16,0 **17,4**	17,1	10,0 12,4 **11,2**
2341, 14	31 32 Среднее	419 422 **421**	409	422 437 **429**	279 279 **279**	290	378 383 **380**	21,4 19,6 **20,5**	16,5	12,0 11,5 **11,8**
2341, 4	41	423	405	456	-	286	304	18,0	16,2	15,0
2341, 6	51	426	408	437	292	287	336	16,6	15,5	14,7
2341, 13	61	422	405	461	284	288	373	19,2	15,1	16
2339, 1	1 2 3 Среднее	431 431 431 **431**	403	-	280 280 282 **281**	281	-	22,0 22,0 22,0 **22,0**	17,0	-
2340, 13	4 5 6 Среднее	423 424 425 **424**	405		274 286 274 **278**	280		21,8 21,6 21,8 **21,7**	17,5	-
Требования документации		≥392			≥275			≥15		

Примечание: свойства, определенные при 1 – при проведении всесторонних исследований, 2 – сдаточном контроле полуфабриката, 3 – перед изготовлением деталей

Из таблицы 10 видно, что прочностные характеристики листов, определенные на разных этапах изготовления (при сдаточном контроле предприятия изготовителя, при промежуточном контроле и входном контроле предприятия потребителя), соответствуют требованиям документации по уровню свойств, однако имеются расхождения в их значениях. Самые низкие значения предела прочности получены при сдаточном контроле, которые ниже, чем при входном (на ~20 МПа) и промежуточном (до 50 МПа). По пределу текучести при растяжении данные входном и сдаточном контролях близки. Значения $\sigma_{0.2}$, полученные при промежуточном, значительно выше других данных и не характерны для сплава 01570 в отожженном состоянии.

Корреляции по относительному удлинению между результатами предприятий не наблюдается.

На точность определения механических свойств оказывают влияние множество факторов, далее рассмотрены некоторые из них.

При проведении всесторонних исследований и сдаточном контроле полуфабриката испытания проводились на современных машинах «Instron», «LF-600» и «Zwick Z 250» с автоматическим определением прочностных характеристик и записью диаграммы растяжения в цифровом виде и графическом с масштабом не менее 100:1. При испытаниях перед изготовлением деталей оскользалась машина «ЦДМ-5» с масштабом до 10:1. Масштаб диаграммы растяжения существенно влияет на точность определения предела текучести графическим способом, Скорость нагружения составляет 2-4 мм/мин, а при испытаниях перед изготовлением она выше – 10 мм/мин. Указанные параметры являются допустимыми по ГОСТ 1497-84 для испытаний алюминиевых сплавов, однако с повышением скорости испытания имеет место постепенный переход от пластического разрушения к более хрупкому, выражающееся в повышении значений предела текучести и уменьшении значений относительных удлинения и сужения.

Для более точного определения деформации дополнительно использовали тензометр, закрепляющийся на рабочей части образца, однако результаты испытаний показали значительный разброс в значениях δ из диаграмм. Известно, что у материалов, образующих при растяжении шейку, измеряемая величина удлинения δ состоит из равномерной δ_p и сосредоточенной δ_c составляющих. Для большинства пластичных материалов величина равномерной деформации значительно меньше сосредоточенной. [Механические свойства металлов А.Е. Фридман]. При испытаниях зона разрыва образца (следовательно, и шейка) может быть расположена как внутри базы измерения тензометра, так и вне её. В первом случае регистрирующим устройством полностью определяется сосредоточенная деформация, а во втором – преимущественно равномерная деформация. Это хорошо видно из сопоставления внешнего вида образцов после разрушения и диаграмм нагрузка-деформация: совокупная деформация образцов, разрушившихся вне базы меньше, чем разрушившихся внутри базы. Таким образом, использование тензометра с базой 10 мм не дало более точных результатов, однако наглядно показывает на одну из вероятных причин неудовлетворительных значений δ. При разрушении образца вблизи нанесенной до испытаний метки несмотря на то, что излом находится внутри базы, часть области сосредоточенной деформации может выйти за пределы расчетной длины и значение удлинения получится заниженным.

Локальные неоднородности и структурные дефекты в металле, в образцах с меньшим сечением в большей степени оказывают влияние на механические свойства и требуют большей выборки.

Выводы по результатам испытаний на определение механических характеристик листов из 01570 в отожженном состоянии

Проведенный анализ результатов испытаний показывает, что расхождение в значениях механических характеристик могут быть вызваны следующими причинами:

1 Различием испытательного оборудования (различием скоростей нагружения)

2 Разной методик проведения испытаний (различием длины рабочей части образцов, сечения рабочей части, неточностью выполнения размера рабочей части образца).

4.2 Исследование изломов листов из 01570 в отожженном состоянии

Строение излома образца № 13 изображено на рисунке 8.1

В изломе наблюдается плоский дефект, типа расслоение, шириной 1,1 мм и протяженностью 25 мм. Расстояние от поверхности листа до плоскости дефекта - 6,7 мм. Дефект имеет темно-серую поверхность с участками разного блеска. На поверхности дефекта наблюдаются отдельные темные включения размером до 0,1 мм. Строение излома вокруг дефекта однородное, цвет серый, матовый. Пор, раковин, крупных включений, кроме описанных, в структуре излома не выявлено.

Внешний вид излома образца № 17 изображен на рисунке 8.2.

В изломе наблюдается участок дефекта типа расслоение протяженностью порядка 3,5 мм вдоль проката. Ширина определена металлографическим способом на шлифе, изготовленном из второй половины образца. Расстояние от поверхности листа до плоскости поверхности дефекта порядка 8,5 мм. Дефект имеет темно-серую поверхность с участками разного блеска. Строение излома вокруг дефекта однородное, цвет серый, матовый. Такого же характера дефект выявлен в образце № 25

4.3 Исследование микроструктуры листов из 01570 в отожженном состоянии

Изображение микроструктуры образцов из сплава 01570 приведено на рисунках 8.3 – 8.4.

На электрополированном шлифе в микроструктуре хорошо выявляются выделения разных фаз, состав которых будет определен при микроанализе. На

образцах после механической полировки также видны менее выраженные выделения, они расположены как по границам, так и в теле зерен.

Поперечное сечение дефекта в образце №17 изображено на рисунках 8.3, 8.3.1. Ширина дефекта 0,38 мм, раскрытие не превышает 2 мкм.

На рисунках 8.4, 8.4.1-8.4.4 изображено сечение дефекта № 23 вдоль проката. Протяженность составляет 2,5 мм, что меньше условной протяженности, определенной УЗК. Вероятно, это связано с тем, что имеют место два (или более) дефекта, расположенные на незначительном расстоянии друг от друга. Раскрытие не превышает 7 мкм.

В таблице 11 приведены размеры обнаруженных дефектов: протяженность, определенная УЗК и по изломам, глубина залегания – УЗК и металлографическим способом либо по излому. Как видно из таблицы 11 УЗК с высокой точностью определяется глубина залегания, при некотором занижении геометрических размеров дефекта.

Таблица 11 – Геометрические параметры дефектов, определенные по изломам и микрошлифам

Номер образца	Глубина залегания дефекта (относительно лицевой поверхности листа), мм		Условная протяженность, мм	
	УЗК	Металлография/излом	УЗК	Излом
3	8,5-9,5	-	6,0	-
13	2,5-2,7	2,6	21,0	25
17	8,5-9,8	8,5	4,0	-
23	7,0-7,2	-	10,0	-
25	6,5-6,7	6,7	8,0	15-20

С помощью сканирующего электронного микроскопа с ЭДА Tescan Vega проводились исследования микроструктуры на электрополированных шлифах и изломах с микроанализом элементов структуры.

На рисунке 9.1 приведено электронно-микроскопическое изображение материала листов из сплава 01570. В таблице 11.1 приведен локальный химический состав, определенный в разных точках. Как видно из рисунка 9.1 и таблицы 11.1, сплав представляет собой твердый раствор с включениями с магнием марганцем и кремнием, а также интерметаллическими выделениями со скандием и цирконием ($Al_3Sc_{1-x}Zr_x$).

Рисунок 9.1 – Изображение структуры листа из сплава 01570 во вторичных электронах

Таблица 11.1 – Химический состав матрицы и включений

Анализ	Mg	Al	Si	Sc	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Сумма
17295a	0,39	59,1		19,57	3,38					17,56	100
17295b		67,91				11,37	20,71				100
17295c	0,19	62,65	0,44			10,71	24,77	0,43	0,79		100
17295d	0,49	70,76				10,37	18,38				100
17295e	6	93,18		0,16		0,42			0,24		100
17295f	5,61	94		0,17		0,22					100

На рисунке 9.2 приведен общий вид излома образца №13 во вторичных электронах. Структурно расслоение выглядит как плоская площадка на фоне вязкого зернограничного разрушения. Более темный контраст указывает на то, что в зоне расслоения присутствуют элементы с атомным номером больше 13.

На рисунках 9.2.1–9.2.3 изображены отдельные участки в зоне дефекта с результатами качественного локального анализа химического состава. Анализ показал, что зона расслоения обогащена кислородом, т.е. представляет собой оксидную плену. Как видно из спектрограмм, в зоне дефекта содержатся частицы с кремнием, железом, кальцием и хлором. Из ранее проводившихся исследований установлено, что в расслоениях могут встречаться следы флюса $MgCl_2$, частицы SiO_2 и CaO – составляющих футеровки печи.

На рисунке 9.3 приведено электрономикроскопическое изображение образца №17 в зоне расслоения. В таблице 11.2 приведен локальный химический состав, определенный в разных точках шлифа. Из таблицы 11.2 видно, что зона расслоения содержит оксиды алюминия, магния и калия.

Таблица 11.2 – Химический состав включений и матрицы

Анализ	Mg	Al	Sc	Mn	Fe	Сумма
17295m	5,78	93,69	0,21	0,32		100
17295n	0,43	69,66		9,66	20,25	100
17295o	5,74	93,7	0,17	0,4		100

Таблица 11.2.1 – Химический состав в зоне расслоения

Анализ	MgO	Al_2O_3	K_2O	Сумма
17295l	3,47	83,75	0,25	100

Выводы

Исследованиями микроструктуры и МРС анализом химического состава материала в зоне расслоения обнаружено наличие окисных включений Al_2O_3, MgO, K_2O, не удалившихся из расплава в процессе рафинирования, отстоя и фильтрации металла. При раскатке листов указанные включения привели к появлению расслоений.

Выводы по результатам исследований листов толщиной 10 мм из сплава 01570

1 Механические свойства образцов из листов сплава 01570 соответствуют требованиям.

2 Значительно отличие механических свойств, полученное на предприятиях, обусловлено различием испытательного оборудования и оснастки, различной формой применяемых образцов, и методическими особенностями испытаний. Для получения более близких характеристик необходимо проведение работ по анализу погрешностей методик испытаний предприятий и приведение их в соответствие.

3 Дефекты, обнаруженные УЗК при входном контроле на образцах, вырезанных из листов толщиной 10 мм сплава 01570, подтверждены металлографическими исследованиями и представляют собой расслоения шириной ~1 мм, вытянутые вдоль направления проката длиной до 25 мм. Раскрытие дефектов, определенное на шлифах, не превышает 7 мкм. Глубина залегания дефектов соответствует, а фактическая протяженность вскрытых дефектов – больше значений, определенных методом УЗК.

4 Микроструктура металла в исследованных сечениях однородная и характерна для структуры сплава 01570. В зоне расслоения обнаружено наличие окисных включений Al_2O_3, MgO, K_2O, попавшие в металл вследствие недостаточной фильтрации при литье.

Рекомендации

1 Для более точного определения механических характеристик необходимо использовать современное испытательное оборудование с цифровой регистрацией и унифицировать применяемые на предприятиях образцы и методики. Предпочтительно использовать образцы с большей длиной рабочей части, например, пропорциональные плоские с начальной расчетной длиной – 100 мм.

2 Для исключения дефектов в листах необходимо проработать вопрос повышения качества металла по неметаллическим включениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных углубленных исследований определено, что обнаруженные дефекты УЗК, а также дефекты в микро- и макроструктуре материала листов толщиной 10 мм и раскатных колец из термических неупрочняемого сплава системы алюминий-магний-скандий 01570 не влияют на уровень механических характеристик, и возможно считать их допустимыми.

Результаты исследования листов толщиной 10 мм показали соответствие уровня механических свойств требованиям. Значительное отличие механических свойств, полученное на предприятиях, обусловлено различием испытательного оборудования и оснастки, различной формой применяемых образцов, и методическими особенностями испытаний. Для получения более близких характеристик необходимо проведение работ по анализу погрешностей методик испытаний предприятий и приведение их в соответствие. Дефекты, обнаруженные УЗК при входном контроле на образцах, вырезанных из листов толщиной 10 мм сплава 01570, подтверждены металлографическими исследованиями и представляют собой расслоения шириной ~1 мм, вытянутые вдоль направления проката длиной до 25 мм. Раскрытие дефектов, определенное на шлифах, не превышает 7 мкм. Глубина залегания дефектов соответствует, а фактическая протяженность вскрытых дефектов – больше значений, определенных методом УЗК. Микроструктура металла в исследованных сечениях однородная и характерна для структуры сплава 01570. В зоне расслоения обнаружено наличие окисных включений Al_2O_3, MgO, K_2O, попавшие в металл вследствие недостаточной фильтрации при литье.

Для более точного определения механических характеристик необходимо использовать современное испытательное оборудование с цифровой регистрацией и унифицировать применяемые на предприятиях образцы и методики. Предпочтительно использовать образцы с большей длиной рабочей части, например, пропорциональные плоские с начальной расчетной длиной – 100 мм.

По результаты исследования раскатных колец установлено, что ультразвуковой контроль на частоте 2,5 МГц приводит к суммированию эхосигналов структурных шумов и к фиксации ложных эхосигналов с амплитудой эквивалентной плоскодонному искусственному отражателю диаметром 1,6 мм. Ультразвуковой контроль на частоте 4,0 МГц позволяет снизить количество ложных эхосигналов. Амплитуда структурных шумов в сплаве 01570М существенно отличается от амплитуды структурных шумов в сплаве Д16Т, из которого изготовлены настроечные образцы комплекта КСО-2. Высокий уровень структурных шумов не позволяет с высокой достоверностью отличать эхосигналы от несплошностей и ложных эхосигналов. При радиографичеком контроле материала образцов, изготовленных из участков с предполагаемыми дефектами УЗК, дефектов не обнаружено. Изломы раскатанного кольца в участках без дефектов УЗК - пластичные (вязкие), в участках с дефектами УЗК - малопластичные. В структуре средних участков темплета после травления наблюдаются пористость, образование которой может быть связано как с выкрашиванием интерметаллических включений, так и структурной неоднороностью по сечению. Размер раковин не превышает 0,5 мм. В структуре наружных участков кольца пористости не наблюдается. По неметаллическим включениям качество материала соответствует требованиям. Механические свойства в радиальном направлении волокна в участках с дефектами УЗК соответствуют требованиям по характеристике σ_{02}, но не соответствуют требованиям по характеристикам $\sigma_в$ - на 2,6 - 4,6 кгс/мм^2, δ -на 2,5 - 3,9%. Снижение механических свойств в участках с дефектами УЗК (средняя часть кольца) может быть связано с недостаточной проработкой структуры в данной части кольца. Рекомендовано ультразвуковой контроль проводить на более высоких частотах.

Для исключения дефектов в листах необходимо проработать вопрос повышения качества металла по неметаллическим включениям и получения более однородной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

2. Балахонцев Г. А., Романова О. А., Телешов В. В. Структура и свойства горячекатаных плит // Там же. С. 165–192.

3. Дриц М. Е., Торопова Л. С., Быков Ю. Г., Елагин В. И., Филатов Ю. А. Структура и свойства сплавов Al – Sc и Al – Mg – Sc // Металлургия и металловедение цветных сплавов. — М.: Наука, 1982. С. 213–223.

4. Елагин В. И., Захаров В. В., Ростова Т. Д., Филатов Ю. А. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием // Технология легких сплавов. 1991. № 12. С. 21–28.

6. Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В. Алюминиевые сплавы, легированные скандием // Металлургия машиностроения. 2005. № 4. С. 10–15.

7. Пат. 2081934 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Елагин В. И., Захаров В. В., Филатов Ю. А. и др.; заявл. 13.07.1995; опубл. 20.06.1997.

8. Пат. 2233345 РФ. Конструкционный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Давыдов В. Г., Елагин В. И. и др.; заявл. 13.01.2003; опубл. 27.07.2004.

9. Пат. 2343218 РФ. Криогенный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В. и др.; заявл. 06.04.2007; опубл. 10.01.2009.

10. Пат. 2082809 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В.; заявл. 25.07.1995; опубл. 27.06.1997.

11. Пат. 2082808 РФ. Сплав на основе алюминия для сварки плавлением / Золоторевский Ю. С., Макаров А. Г., Махмудова Н. А. и др.; заявл. 13.07.1995; опубл. 27.06.1997.

12. Рязанцев В. И., Филатов Ю. А. Дуговая сварка алюминиевых сплавов, легированных скандием // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 8. С. 8–12.

13. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. — Введ. 1967-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2006.

14. Малинкина Т. И., Маркачев Н. А., Ковтун В. А., Буханова Н. М. Сварные конструкции из алюминиевого сплава 01570 // Сварочное производство. 1998. № 1. С. 17–20.

15. Рязанцев В. И., Федосеев В. А., Мацнев В. Н. Технологические аспекты производства баков для жидкого водорода и сжиженного природного газа // Технология машиностроения. 2002. № 2. С. 28–34.

16. New weight-saving alloys from Aleris for use in modern aircraft construction // APT Aluminium News. 2009. Vol. V, Iss. 3, Sept. P. 1–2.

17. Пат. 2410458 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Захаров В. В., Панасюгина Л. И.; заявл. 20.10.2009; опубл. 27.01.2011.

18. Пат. 2384636 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В. и др.; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.03.2010.

19. Пат. 2416658 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Аксенова Е. А., Панасюгина Л. И. и др.; заявл. 20.04.2010; опубл. 20.04.2011.

20. Пат. 2384637 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю. А., Елагин В. И., Захаров В. В. и др.; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.03.2010.

21. Пат. 2416657 РФ. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Пименов Ю. П., Филатов Ю. А., Конкевич В. Ю. и др.; заявл. 20.04.2010; опубл. 20.04.2011.

22. Крутикова И. М., Белов А. В., Герасимов В. Н., Коперник Н. В. Конструкционные алюминиевые сплавы для получения особо чистых фторидов

щелочных и щелочноземельных металлов // Технология легких сплавов. 1997. № 5. С. 24–27.

23. Альтовский И. В., Вотинов С. Н., Добаткин В. И., Дриц М. Е., Елагин В. И., Иванов Л. И., Орлов В. В., Платов Ю. М., Торопова Л. С., Филатов Ю. А. Перспективы применения алюминиевых сплавов в качестве конструкционных материалов для термоядерных реакторов // Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. — М.: Наука, 1983. С. 40–48.

24. Справочник по алюминиевым сплавам / под ред. В. И. Елагина. — ВИЛС, 1978. — 132 с.