

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
Учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте
Факультет «Техники и технологии»
Кафедра «Техника и технологии производства материалов»
Направление подготовки «Металлургия»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент зам. генерального
конструктора по тех. обеспечению
АО «ГРЦ Макеева»
_____М.В. Дорофеев
_____2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
профессор, д.т.н.
_____И.В. Чуманов
_____2021 г.

Влияние включений интерметаллидов на структуру и прочностные свойства
сплава 01570

ПОЯНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР

Технологический контроль
доцент к.т.н.
_____А.В. Рябов.
_____2021 г.

Руководитель работы
доцент к.т.н.
_____Д.А. Пятыгин
_____2021 г.

Автор работы
студент группы ФТТ-250
_____Д.Е. Романова
_____2021 г.

Нормоконтролер
инженер
_____В.В. Седухин
_____2021 г.

г. Златоуст 2021г.

АННОТАЦИЯ

Романова Д.Е. Влияние включений интерметаллидов на структуру и прочностные свойства сплава 01570 – Златоуст: ЮУрГУ, ТиТПМ, 2021. – 58 с., библиогр. список –37 наим.

В качестве объекта исследования выбран алюминиевый деформируемый не упрочняемый термической обработкой сплав 01570.

Целью работы являлось выявление зависимости прочностных свойств от включений интерметаллидов.

Для достижения цели магистерской диссертации разработаны и решены следующие задачи:

- изучена и проанализирована классификация алюминиевых сплавов;
- особенности деформируемых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc и возможные пути повышения их прочностных свойств;
- разработана методика исследования;
- исследовано влияние включений интерметаллидов на прочностные свойства сплава 01570.

Область применения алюминиевого деформируемого сплава 01570– авиакосмическая техника и ракетостроение, для которых необходимо снижение массы конструкций летательных аппаратов при высокой удельной прочности и жесткости имеет большое значение.

					22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	Влияние включений интерметаллидов на структуру и прочностные свойства сплава 01570	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Романова Д.Е.</i>						5	58
<i>Провер.</i>	<i>Пятыгин Д.А.</i>							
<i>Рецензент</i>	<i>Дорофеев М.В.</i>					ФГБАУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» Кафедра «ТиТПМ»		
<i>Н. контр.</i>	<i>Седухин В.В.</i>							
<i>Утверд.</i>	<i>Чуманов И.В.</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПАТЕНТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	9
1.1 Классификация алюминиевых сплавов.....	10
1.2 Термическая обработка и методы упрочнения сплавов.....	21
1.3 Технологические свойства сплава 01570	24
1.4 Особенности структуры и механические свойства сплава 01570	25
1.5 Технология получения деформируемых полуфабрикатов из сплава 01570 .	32
1.6 Особенности формирования интерметаллидов в алюминиевых сплавах	37
2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1 Материал исследования	40
2.2 Методика исследования.....	40
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	47
3.1 Результаты механических испытаний.....	47
3.2 Результаты исследования микроструктуры.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	50

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			6

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и его сплавы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. При этом наиболее привлекательным остается применение алюминия как материала для конструкций в области авиации и космонавтики, где наиболее полно используется весь уникальный комплекс его свойств.

К настоящему времени исследования алюминиевых сплавов в большей степени проводились для сплавов системы АМгб. Алюминиевые сплавы на основе магния, легированные скандием изучены в гораздо меньшей степени. Кроме того, при исследовании и подборе режимов обработки алюминиевых сплавов основное внимание уделяется морфологии и поведению основных фаз - α и β . Однако если не учитывать выделения интерметаллидных частиц и их влияние на свойства сплавов, то невозможно получить истинную картину формирования их структуры и свойств. Изучение влияния выделений интерметаллидов будет способствовать грамотному и осознанному подбору режимов нагрева и термической обработки и сварки. Проведенные до настоящего времени работы по исследованию выделений интерметаллидов в алюминиевых сплавах, в частности сплавах легированных скандием, дают противоречивую информацию по их влиянию на служебные характеристики и требуют уточнения.

Особенно мало изучены включения интерметаллидов в легированных и высоколегированных сталях переходными металлами отчасти вследствие больших затруднений с их выделением.

Целью магистерской диссертации является исследование влияния включений интерметаллидов на структуру и прочностные свойства в сплавах системы Al-Mg-Sc.

В качестве объекта исследования выбран алюминиевый деформируемый не упрочняемый термической обработкой сплав 01570.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		7

В связи с вышеизложенным в работе были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать классификацию алюминиевых сплавов;
2. Изучить особенности деформируемых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc и возможные пути повышения их прочностных свойств;
3. Изучить алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Sc;
4. Разработать методику исследования;
5. Изучить влияние скандия на процессы образования и роста частиц интерметаллидов, а также их роль в формировании технологических и служебных характеристик алюминиевых сплавов 01570;
6. Исследовать влияния включений интерметаллидов на структуру и прочностные свойства в сплавах системы Al-Mg-Sc.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
							8
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		

1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПАТЕНТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Новые задачи, вставшие перед обществом на современном этапе развития, значительно повышают требования к таким отраслям производства, как металлургия и машиностроение. Как следствие, необходимым становится увеличение производства новых материалов и сплавов. Особое место в этом производстве принадлежит алюминию и его сплавам за счет сочетания малой плотности и высокой прочности, что способствует их широкому использованию во многих отраслях промышленности. [1]

Фактически не существует ни одной отрасли машиностроения, в которой бы не использовали в какой-то мере алюминий и его сплавы. Их используют в современных постройках, кораблестроении, железнодорожном и автомобильном транспорте, летательных аппаратах, нефтяном и химическом машиностроении, электротехнике.

Из алюминиевых сплавов производят самые разнообразные детали холодильной и криогенной техники. Их используют с целью производства хранилищ и емкостей для перевозки жидких газов как кислород, азот, водород и гелий, не упоминая даже об установках сжижения и хранения природного газа. Алюминиевые сплавы применяют в качестве материала для ректификационных колонн и трубных систем.

Уникальность алюминия, как конструкционного материала, определяется совокупностью физико-механических и технологических качеств, основные из которых это технологичность, высокая коррозионная стойкость в различных средах, малая плотность при удовлетворительной прочности, широкие пределы изменения прочностных характеристик в зависимости от системы, марки и состояния поставки и др.

В качестве конструкционного материала широко используются термически неупрочняемые алюминиевые сплавы на основе системы Al–Mg. Однако, применение традиционных магналиев ограничивается тем, что запас повышения их проч-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		9

ности практически исчерпан. В связи с этим достаточно перспективным является легирование таких сплавов малыми добавками редкоземельных (РЗМ) и переходных (ПМ) металлов, в частности скандием и цирконием. Широкое использование этих элементов в качестве легирующих обусловлено тем, что они позволяют не только повысить прочность за счет выделения большого количества упрочняющих интерметаллидов, но и сохранить такие эксплуатационные свойства сплавов, как свариваемость, коррозионная стойкость и др. [2]

1.1 Классификация алюминиевых сплавов

В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы можно разделить на деформируемые и литейные. Помимо этого, методами порошковой металлургии изготавливают САП (спеченные алюминиевые порошки) и САС (спеченные алюминиевые сплавы). Заготовки, полученные методами порошковой металлургии, затем подвергают обработке давлением, поэтому порошковые алюминиевые сплавы следует рассматривать как разновидность деформируемых.

В США принята единая цифровая, четырехзначная система обозначений деформируемых алюминиевых сплавов, введенная Алюминиевой Ассоциацией (АА). Она является наиболее распространенной и используется в качестве международной. В её основе - система легирования алюминиевых сплавов, база - основной легирующий компонент. Первая цифра обозначения указывает на систему легирования, к которой относится сплав.

1000 серия — чистый алюминий с минимум 99% содержанием алюминия по весу.

2000 серия — сплавы, легированные медью, дуралюмины, они были когда-то самым распространенным из аэрокосмических сплавов. Главный недостаток — чувствительность к коррозионному растрескиванию и сплавы этой серии все чаще заменяются на серию 7000.

3000 серия — сплавы, легированные марганцем. Сплавы типа АМц.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		10

4000 серия — сплавы, легированные кремнием. Они также известны как силумины.

5000 серия — сплавы, легированные магнием. Сплавы типа АМг.

6000 серия — сплавы, легированные магнием и кремнием, самые пластичные, и могут быть термоупрочнены закалкой на твердый раствор, но не достигают высокой прочности, как в 2000 и 7000 серии.

7000 серия — сплавы, легированные цинком, магнием, термоупрочняемые, самые прочные из алюминиевых сплавов.

8000 серия в основном используются для литиевых сплавов и прочих систем легирования.

Вторая цифра обозначения указывает на порядковый номер модификации сплава относительно исходного сплава (в исходном - вторая цифра "0") или свидетельствует о чистоте сплава по примесям. Две последние цифры обозначают непосредственно сплав и дают информацию о его чистоте. [3]

Рисунок 1.1 – Классификация алюминиевых сплавов

Деформируемые и литейные сплавы можно разделить на термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Термическое упрочнение, в свою очередь, может достигаться закалкой с последующим естественным или искусственным старением. Поскольку свойства сплавов зависят, прежде всего, от их фазового состава, применяемые в промышленности сплавы можно также разбить по системам легирования, в которых основные легирующие компоненты будут определять типичные для данной системы физические и химические свойства.

К деформируемым алюминиевым сплавам, не упрочняемые термической обработкой принадлежат сплавы алюминия с марганцем либо с магнием. После замедленного охлаждения структура этих сплавов состоит только из α твердого раствора марганца или магния в алюминии. Применение термообработки с целью увеличения прочности невозможно, потому что никаких структурных изменений в этих

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		11

сплавах при нагревании и охлаждении не происходит. Следовательно, упрочнение данных сплавов возможно только за счет холодной пластической деформации, т.е. наклепа.

Деформируемые конструкционные алюминиевые сплавы – это, главным образом, сплавы алюминия с четырьмя компонентами: Cu, Mg, Zn и Si, к числу которых относительно недавно добавились Li и Ag. [5]

Все перечисленные компоненты выбраны по одному признаку – они имеют наибольшую по сравнению с другими известными элементами растворимость в твердом алюминии, резко снижающуюся с понижением температуры, в результате чего при охлаждении сплавов с этими компонентами из твердого раствора выделяются интерметаллидные фазы, а при нагреве – растворяются. Это фазовое превращение (единственное в твердых алюминиевых сплавах) открыло возможность в сильной степени влиять на структуру и свойства сплавов посредством термической обработки.

Основные системы легирования алюминиевых сплавов и упрочняющие фазы приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Развитие систем легирования алюминиевых сплавов [3]

Система	Упрочняющая фаза	Год открытия упрочняющего эффекта	Марка сплава
Al-Cu, Al-Cu-Mg	$CuAl_2$, Al_2CuMg	1903-11	Д1, Д16, Д18, АК4-1, Д19
Al-Mg-Si	Mg_2Si	1915-21	АД31, АД33
Al-Mg-Si-Cu	Mg_2Si , $W_{фаза}(Al_2CuMgSi)$	1922	АК6, АК8
Al-Zn-Mg	$MgZn_2$, Т-фаза ($Al_2Mg_2Zn_3$)	1923-24	В92, 1915, 1925

Al-Zn-Mg-Cu	MgZn ₂ , T-фаза (Al ₂ Mg ₂ Zn ₃), S _{фаза} (Al ₂ CuMg)	1932	B95, 01987
Al-Cu-Mn	CuAl ₂ , Al ₁₂ Mg ₂ Cu	1938	Д20, 1201
Al-Mg	твердорастворное уп- рочнение, Al ₃ Mg	1946	АМг3, АМг5, АМг6
Al-Cu-Li	T-фаза (Al _{7,5} Cu ₄ Li)	1956	ВАД23
Al-Li-Mg	Al ₂ LiMg	1963-65	1420,1460
Al-Mg-Sc	Al ₃ Sc, Al ₃ Sc _{1-x}	1982-85	01570

1.1.1 Сплавы системы Al – Mg (магналии)

Алюминиевые деформируемые сплавы на основе системы Al—Mg являются термически неупрочняемыми. Они имеют невысокие прочностные характеристики — временное сопротивление и, в особенности, предел текучести, но отличаются высокой пластичностью, хорошей коррозионной стойкостью в различных средах и хорошо свариваются аргонодуговой сваркой. ГОСТ 4784–97 определяет марки и химический состав этих сплавов, называемых магналиями. [4]

Промышленные сплавы этой системы в соответствии с равновесной диаграммой состояния (рисунок 1.2) представляют собой α-твердый раствор с частицами второй фазы Al₃Mg₂. Кроме того в сплавах могут присутствовать фазы, содержащие марганец, и фаза Mg₂Si.

Рисунок 1.2 – Равновесная диаграмма состояния Al—Mg (заштрихованная зона – область составов промышленных сплавов)

Использование сплава АМг6 в конструкциях летательных аппаратов объясняется его несомненными достоинствами, такими как:

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		13

- удовлетворительная свариваемость, позволяющая получать сварные соединения, близкие по прочности к основному металлу;
- высокая коррозионная стойкость, позволяющая работать в агрессивных средах – в компонентах топлива и в морских условиях;
- достаточно высокая пластичность;
- высокая технологичность в металлургическом и машиностроительном производствах, связанная, в частности, с отсутствием необходимости в упрочняющей термической обработке полуфабрикатов и готовых деталей. [3]

Вместе с тем существенным недостатком сплава АМгб является его довольно низкая прочность: гарантированный предел текучести, основная расчетная характеристика для большинства конструкций, у отожженных полуфабрикатов из сплава АМгб составляет всего лишь 120–155 МПа, в зависимости от вида полуфабриката.

Актуальной является проблема поиска таких новых сплавов, которые наряду со всеми достоинствами, присущими сплаву АМгб, имели бы более высокие прочностные свойства. [4]

Таким образом, разработка и внедрение новых, более прочных, коррозионно-стойких, технологичных, термически неупрочняемых алюминиевых сплавов – это существенный вклад в решение проблемы повышения тактико-технических данных изделий и возможность создания новых типов летательных аппаратов с использованием сварки как основного метода соединений.

1.1.2 Сплавы системы Al – Mg – Sc (01570)

В настоящее время разработана большая группа деформируемых Al-Mg-Sc сплавов, отличающихся друг от друга, в основном, содержанием магния (от 0,9 до 6,3%). Все эти сплавы относятся к категории термически неупрочняемых. Наибольшее распространение среди сплавов системы Al-Mg-Sc получил сплав 1570, содержащий около 6% Mg. Данный сплав в рассматриваемой системе условно относится к группе высокопрочных сплавов. По прочностным свойствам полуфабрикаты из этого сплава существенно превосходят, особенно по пределу текучести

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		14

(σ0.2), аналогичные полуфабрикаты из Al-Mg сплавов с тем же содержанием магния (АМг6) и приближаются к полуфабрикатам из распространенных термически упрочняемых алюминиевых сплавов в закаленном и состаренном состоянии. Так, добавка скандия к сплаву Al - 6%Mg повышает предел текучести с 157 до 265 МПа. В то же время предел прочности сплава очень близок к алюминиевым сплавам 1163 и АА2524 и составляем 380-420 МПа. Легирование Al-6%Mg сплавов скандием позволяет повысить не только их прочностные, но и усталостные свойства.

Преимущество сплава 01570 перед дуралюминами в том, что он является термически неупрочняемым, не требует проведения закалки и устранения внутренних напряжений. Коррозионная стойкость сплава 01570 такая же, как и у обычных сплавов Al-6%Mg, т.е. достаточно высокая. Кроме того, он обладает хорошей свариваемостью. Благодаря модифицирующему действию скандия резко измельчается структура сварного шва. Сварной шов получается плотным и устойчивым против горячих трещин. Дисперсные частицы интерметаллида в зависимости от температурных и скоростных условий пластической деформации сплава в большей или меньшей степени повышают температуру рекристаллизации и способствуют, в результате высокотемпературных нагревов, получению нерекристаллизованной структуры и дополнительного упрочнения сплава. [5]

Разработаны главные металлургические принципы, положенные в основу исследования новых высокопрочных сплавов на основе системы Al-Mg-Sc, подобных сплаву АМг6, однако обладающих иной металлургической природой (механизм упрочнения).

1) Новые сплавы допускается расценивать как алюминиево-магниевые сплавы вида АМг6, и таким образом для них, так же, как и для всех магниевых, главным типом упрочнения служит твердорастворный механизм. В полуфабрикатах в последствии отжига в твердом растворе находится магний, который оказывает сильное упрочняющее действие.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		15

2) Добавка скандия объясняет два других механизма упрочнения – дисперсионное твердение и структурное упрочнение. Данные механизмы связаны с формированием дисперсных частиц скандиевой фазы, которые оказывают непосредственное упрочняющее действие и стремительно увеличивают температуру рекристаллизации деформированного полуфабриката. В отличие от упрочняющих фаз в большинстве высокопрочных термически упрочняемых деформируемых алюминиевых сплавов, дисперсные частицы фазы Al_3Sc не являются результатом специальной упрочняющей термообработки (закалки и последующего искусственного или естественного старения), а представляют собой продукт высокотемпературного распада пересыщенного твердого раствора скандия в алюминии, образующегося в слитке при кристаллизации.

3) Распад пересыщенного твердого раствора происходит при нагревах и горячей деформации в процессе переработки слитка в деформируемый полуфабрикат, при этом нагрев заготовки не должен приводить к коагуляции частиц упрочняющей фазы и потере ее когерентности с матрицей.

Основные механизмы упрочнения сплавов (твердорастворный, дисперсионное твердение за счет скандиевой фазы, структурное упрочнение) определяются целой совокупностью технологических процессов производства полуфабрикатов - критериями литья слитков, режимами гомогенизации слитков, режимами обработки давлением и режимами отжига. В большинстве классических термически упрочняемых дисперсионно твердеющих алюминиевых сплавов упрочнение от термообработки обратимо. Следовательно, оно может быть достигнуто после закалки и старения, ликвидировано после отжига и вновь достигнуто в последствии повторных закалки и старения. В отличие от них, в новом сплаве упрочнение, достигаемое в следствии определенной регламентации всего технологического процесса производства полуфабриката, невосвратимо. Путем высокотемпературного отжига можно будет разупрочнить сплав из-за коагуляции дисперсных частиц скандиевой фазы и рекристаллизации структуры, но после такого отжига восстановить прочность будет уже нельзя. [6]

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		16

Данное условие ставит некоторые ограничения на температурные характеристики технологии производства деформированных полуфабрикатов из нового сплава, в частности таких элементов этой технологии, как гомогенизационный отжиг слитков, нагрев литой заготовки под деформацию, отжиг готовых полуфабрикатов.

Металловедческая концепция создания новых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc и технологии производства из них деформированных полуфабрикатов состоит в следующем.

Процесс изготовления новых сплавов условно разделен на пять технологических этапов. Скандий, наравне с иными легирующими компонентами (Mg, Mn, Zr, Ti, Be и др.) в ходе плавления шихты (этап I) сформирует гомогенный расплав и после затвердевания слитка располагается в пересыщенном твердом растворе. При этом имеется в виду, что некоторая, крайне незначительная часть скандия (а кроме того циркония и титана) будет израсходована на модифицирование слитка. Прочность металла на этапе I увеличивается в следствии воздействия механизма твердо-растворного упрочнения вплоть до степени, соответствующей уровню прочности обычных магналиев. Количество вводимой добавки скандия не должно быть выше его максимальной растворимости для данной скорости охлаждения литого металла при кристаллизации и, если ориентироваться на результаты лабораторных экспериментов, то его содержание в сплаве не должно быть выше 0,5-0,6% для очень мелких слитков и 0,2-0,3% для слитка крупных сечений.

При гомогенизации слитка (этап II) выделения неравновесной β -фазы должны быть переведены в твердый раствор магния в алюминии, одновременно с этим должен проходить процесс высокотемпературного распада пересыщенного твердого раствора скандия и других переходных металлов в алюминии с образованием дисперсных выделений скандиевой фазы-упрочнителя. Повышение прочности металла на этапе II достигается в результате непосредственного упрочняющего действия вторичных выделений скандиевой фазы.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		17

Вторичные выделения скандиевой фазы препятствуют протеканию процессов рекристаллизации при горячей деформации слитка и в соответствии с предложенной схемой (этап III) горячедеформированный полуфабрикат должен иметь нерекристаллизованную структуру с зернами в виде вытянутых волокон и достаточно развитую субструктуру. Повышение прочности металла на этапе III происходит в результате действия механизма структурного упрочнения.

При изготовлении листов в процессе холодной прокатки горячекатаной заготовки (этап IV) происходит обычное в таких случаях деформационное упрочнение. Структура листа должна приобрести тонковолокнистый характер, пластичность металла при этом снижается и для ее восстановления необходим отжиг (этап V). Предполагается, что необходимый уровень пластичности будет достигнут за счет отжига при температуре, не превышающей температуру начала рекристаллизации. Это позволит сохранить прочностные свойства отожженного деформированного полуфабриката за счет сохранения нерекристаллизованной структуры. Повышение пластических характеристик будет являться следствием совершенствования субструктуры.

Фактический химический состав серийных сплавов, приведен в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Химический состав стандартных сплавов [3]

Сплав	Содержание элементов, %								
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Sc
1545	Осн.	0,07	0,12	0,03	0,3	4,7	0,02	0,10	0,21
1570	Осн.	0,08	0,14	0,02	0,4	5,94	0,02	0,07	0,28
1575	Осн.	0,08	0,14	0,03	0,50	5,6	0,17	0,09	0,24
Св1597	Осн.	0,07	0,10	0,03	0,60	5,77	0,18	0,09	0,44

Гарантируемые механические характеристики полуфабрикатов из промышленных сплавов в различных состояниях представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Гарантируемые (не менее) механические характеристики катаных полуфабрикатов из сплавов системы Al—Mg

Сплав	Состояние	Полуфабрикат	Толщина, мм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
				МПа		
AMг6	М	Листы	0,5–0,6	305	145	15
			0,6–10,5	315	155	15
			5,0–10,5	315	155	15
	Без ТО	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
	Н		0,8–2,3	460	410	4

1.1.3 Область применения сплавов системы Al-Mg

В настоящее время авиационная, космическая и судостроительная промышленность являются самыми передовыми отраслями машиностроения, в которых реализуются новейшие разработки в области науки и техники.

За последние годы наибольший объем потребления алюминия пришелся на строительство и транспорт – более 50 % всего мирового использования металла (рисунок 1.3). Хотя на долю машиностроения приходится всего 9 %, развитие и применение передовых технологий в этом сегменте промышленности является стратегически важной задачей, так как к авиационной, космической и судовой технике предъявляются высокие требования по надежности конструкций и экономическим показателям.

Сплавы на основе алюминия широко применяются в современной технике, особенно в тех случаях, когда важно снизить массу конструкции за счет применения материала с высокой удельной прочностью, поэтому ведущими отраслями, с позиции потребления алюминиевых сплавов, являются авиа- и судостроение, космическая и автомобильная промышленность.

Основной объем полуфабрикатов, потребляемых данными областями, составляют изделия в виде листов и плит для обшивки корпусов, получаемые по технологии горячей и холодной прокатки. Профили, прутки, трубы, заклепочная и сварочная проволока могут производиться методами прессования, прокатки или волочения. Профильные и листовые полуфабрикаты также применяют в строительстве. По данным работы подавляющее большинство алюминия (60-80 %), используемого в строительстве, это прессованные и гнутые профили, а катаные профили в алюминиевых конструкциях практически не применяют. [7]

Сплав 01570 также нашел применение в изделиях Государственного Ракетного Центра (ГРЦ) им. Макеева для крупных штампосварных конструкций.

Для производства изделия МКБ «Факел» были использованы листы толщиной 2,3 мм и прутья диаметром от 90 до 250 мм из сплава 01570, и это способствует понижению веса изделия на 15 % и увеличению его основных эксплуатационных свойств.

Рисунок 1.3 – Типовая структура потребления алюминия по отраслям

Алюминиевые сплавы, применяемые в ведущих отраслях машиностроения, должны обладать хорошими литейными свойствами, свариваемостью, пластичностью и коррозионной стойкостью при достаточном уровне прочности.

Сплавы системы Al–Mg как нельзя лучше подходят для решения таких задач. Уровень прочности этих сплавов в значительной мере зависит от содержания в них основного легирующего компонента – магния. Высокая стойкость магниевых сплавов к коррозии объясняется образованием на поверхности плохо растворимой оксидной пленки.

Серийно в изделиях космической отрасли применяется сплав на основе системы Al–Mg–Sc марки 01570, который частично заменил стандартный сплав АМг6 в сварных конструкциях. Из сплава 01570 изготавливают раскатные кольца, штамповки, прессованные профили, катаные плиты. [8]

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		20

Алюминиевые сплавы, применяемые в ведущих отраслях машиностроения, должны обладать хорошими литейными свойствами, свариваемостью, пластичностью и коррозионной стойкостью при достаточном уровне прочности.

Таким образом, сплавы системы Al–Mg–Sc как нельзя лучше подходят для решения таких задач. Уровень прочности этих сплавов в значительной мере зависит от содержания в них легирующих компонентов. Именно такими свойствами обладает сплав 01570, используемым в космической отрасли.

1.2 Термическая обработка и методы упрочнения сплавов

1.2.1 Упрочнение методом холодной деформации (нагартовка)

Этот способ упрочнения обширно используется в промышленности для повышения прочности листов и реže плит, предел прочности при этом повышается примерно на 25%, а предел текучести - в 2 раза по сравнению с отожженным состоянием. Основные недостатки этого способа упрочнения: пониженная пластичность (6-9%), снижение прочности материала в зоне сварки и невозможность его использования для большинства остальных полуфабрикатов, кроме листов и плит.

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.

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.

Отжиг полуфабрикатов и изделий из магниевых сплавов необходимо проводить при температуре 310–335 °С в течение 1–2 ч с последующим охлаждением на воздухе.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		21

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. [9]

1.2.2 Легирование цирконием

Цирконий в алюминиевых сплавах обычно содержится в пределах 0,1 – 0,25 %. Выделения фазы Al₃Zr дисперсны, тем не менее, эффект дисперсионного твердения от выделений фазы Al₃Zr в связи с малым содержанием циркония в сплавах незначителен. Некристаллизованная (полигонизованная) структура после термообработки с большим эффектом структурного упрочнения для сплавов с добавкой циркония может быть получена для широкой номенклатуры полуфабрикатов, — практически для всех прессованных, катаных плит, штамповок и поковок, и кроме того для некоторых холоднодеформированных полуфабрикатов (листов) из алюминиевых сплавов. Незначительное введение циркония в сплавы авиакосмического назначения привело к значительному повышению прочности, трещиностойкости и сопротивления усталости. Все сплавы этой системы, созданные в последние годы в ВИАМе с участием ВИЛСа, содержат от 0,1 до 0,2% Zr. [10]

1.2.3 Легирование скандием

В следствии изучения роли других переходных металлов в алюминиевых сплавах идея использования скандия как легирующей добавки в алюминиевые деформируемые сплавы впервые в России была высказана В.И. Елагиным в начале 70-х годов. В конце 70-х годов в ИМЕТ им. А.А. Байкова командой ученых под руководством М.Е. Дрица были проведены опыты по изучению воздействия скандия, иттрия, лантана, церия, европия, гадолиния, диспрозия, тербия и гольмия на свойства двойного сплава Al-6,5%Mg, которые помогли выяснить, что введение в сплав десятых долей процента скандия приводит к значительному увеличению прочностных свойств. Данные сведения дали возможность высказать гипотезу о том, что ле-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		22

гирование магналиев скандием является радикальным и, по-видимому, единственным методом значительного увеличения их прочностных свойств без убытка для других эксплуатационных характеристик, что открывает возможности для создания новой группы промышленных термически неупрочняемых сплавов, базой которых является система Al-Mg-Sc.

Скандий, оказался, по крайней мере, применительно к некоторым сплавам, наиболее эффективным легирующим компонентом из всех ранее известных; выделения фазы Al_3Sc значительно более дисперсны, нежели выделения алюминидов Zr. Скандий при содержании в сплавах от 0,15 до 0,25 % объясняет весьма высокий эффект дисперсионного твердения слитков при правильно подобранных температурных режимах их обработки. Упрочнение от введения скандия в равной мере обуславливается воздействием формирования в полуфабрикате субзеренной структуры и непосредственным дисперсионным твердением. Малое введение скандия и циркония в сплав повышают предел текучести почти в 2 раза. [11]

1.2.4 Увеличение содержания магния

Сплавы, легированные незначительными добавками магния (до 3,5%) характеризуются достаточно крупно зернистой структурой. Последующее увеличение магния (вплоть до 7,5%) измельчает микрзерна, структура становится однородной и мелкозернистой. С ростом содержания магния возрастают прочность и текучесть, относительное удлинение изменяется незначительно. Подобная модификация свойств сопряжена с увеличением пересыщенности твердого раствора по мере повышения концентрации магния.

Сплавы легированные магнием различаются высокой коррозионной стойкостью. Необходимо заметить их высокую сопротивляемость коррозионному разрушению в морской воде. [10]

Таким образом, полуфабрикаты из сплавов Al - Mg подвергаются только отжигу для снятия нагартовки и перевода их в мягкое отожженное состояние. Так как нагартовка повышает прочностные характеристики, особенно предел текучести.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		23

1.3 Технологические свойства сплава 01570

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. [12]

Таблица 1.4 Характеристики сварных соединений листов толщиной 2 мм сплавов системы Al—Mg [12]

Сплав	$\gamma_3^{сх}$, МПа	Коэффициент ослабления сварного шва, $\gamma_3^{сх}$	Коэффициент трещинообразования $K_{тр}$, %	Угол загиба, град
АМг1	90	0,9	15	120
АМг2	170	0,9	10	120
АМг3	210	0,9	5	120
АМг5	240	0,9	10	90
АМг6	290	0,85	5	90
01570	400	0,85	0	100

Сплавы системы Al – Mg обладают хорошей свариваемостью. С повышением содержания магния коэффициент трещинообразования при сварке уменьшается (таблица 1.4). 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.

Таким образом, сплав 01570 обладает удовлетворительной штампуемостью и хорошей свариваемостью.

1.4 Особенности структуры и механические свойства сплава 01570

Деформированные полуфабрикаты из сплавов системы Al–Mg в большинстве случаев имеют рекристаллизованную структуру, кроме прессованных полуфабрикатов из сплава АМг6 с содержанием марганца ближе к верхнему пределу и полуфабрикатов из сплава 1561, имеющего повышенное содержание марганца и дополнительно легированного цирконием.

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.

Химический состав сплава 01570 согласно ГОСТ 4784-2019 представлен в таблице 1.5. [13]

Таблица 1.5 – Массовая доля элементов

В процентах

Cr	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sc	Be	Zr	Al
н.б.	н.б.	н.б.	0,2	3,0	н.б.	0,01	0,17	0,0002	0,05	основа
0,2	0,3	0,1	0,6	6,3	0,1	0,05	0,27	0,005	0,15	

Скандий, используемый в качестве легирующего элемента в алюминиевых сплавах, оказался наиболее эффективным из всех ранее известных, применительно к данной группе сплавов — выделения фазы Al_3Sc более дисперсные (1–10 нм), чем выделения с другими металлами. Это объясняется тем, что высокая стабильность дисперсных выделений этой фазы в большой степени влияет на формирование ячеистой структуры деформированных полуфабрикатов. Дисперсные частицы интерметаллида в зависимости от температурных и скоростных условий пластической деформации сплава в большей или меньшей степени повышают температуру рекристаллизации и способствуют, в результате высокотемпературных нагревов, получению нерекристаллизованной структуры и дополнительному упрочнению сплава. По мере повышения дисперсности алюминиевых фаз увеличиваются как эффект непосредственного дисперсионного твердения, так и величина структурного упрочнения. [15]

В ряде работ установлено, что ПМ оказывают эффективное легирующее и модифицирующее действие на структуру алюминиевых сплавов. Согласно этим данным, упрочняющий эффект от добавок скандия достигается, во-первых за счет того, что этот элемент является эффективным модификатором и стабилизатором литой структуры, позволяющий получать слитки с недентритной мелкозернистой структурой (рисунок 1.4). [16]

а

б

Рисунок 1.4 – Микроструктура слитка сплава Al–Mg–Sc типа 01570:

а - без Sc; б - с добавкой 0,2% Sc, $\times 100$

При добавке скандия температура рекристаллизации холоднодеформированных полуфабрикатов алюминиевых сплавов резко повышается в соответствии с рисунком 1.4, что способствует достижению высоких механических свойств. Причиной такого сильного подавления рекристаллизации заключается в образовании большого количества дисперсных Al_3Sc частиц в объеме материала. [17]

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		26

Таблица 1.6 – Минимальные механические свойства полуфабрикатов из сплава 01570 при комнатной температуре

Полуфабрикат	Состояние материала	Направление	Механические свойства		
			σ_B , МПа (кгс/мм ²)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	δ , %
Листы 01570М 6,0-10,0 мм	Отожженное	Поперечное	373 (38,0)	255 (26,0)	13,0
Плиты 01570М толщиной до 35 мм	Отожженное (после дрес- сировки)	Поперечное, продольное	353 (36,0)	235 (24,0)	14,0
Заготовки штам- пованные, кованные, раскатанные 01570М массой до 1000 кг вкл.	Отожженное	Долевое	353 (36,0)	235 (24,0)	11,0
		Тангенциаль- ное	353 (36,0)	235 (24,0)	11,0
		Радиальное	334 (34,0)	205 (21,0)	9,0

Пристальное внимание специалистов к скандию, как к легирующему компоненту, который можно эффективно использовать для легирования алюминиевых сплавов, вызвано целым рядом его достоинств. Во-первых, скандий является самым сильным модификатором литой зеренной структуры в алюминиевых сплавах и пока единственным, позволяющим получать слитки непрерывного литья (диаметром до 800 мм) с недендритной структурой. [18]

Рисунок 1.5 – Эскиз части фазовой диаграммы Al-Sc. Символ «X» указывает на заэвтектический состав

Рассмотрим фазовую диаграмму Al–Sc на рисунке 1.5. Существует точка эвтектики, которая находится около 0,6 мас.% Sc и 659 °С. Если расплавленный сплав заэвтектического состава "x", как показано на рисунке медленно охлаждать, то сначала из расплава будут выделяться частицы Al₃Sc. Параметр решетки Al₃Sc близок к Al, и при температуре 659 °С они составляют около 0.414 нм и 0.412 нм соответственно. Из-за сходства строения атомов, частицы Al₃Sc являются зародышами кристаллизации для алюминия при последующем охлаждении ниже температуры эвтектического превращения. Было доказано, что эффект измельчения зерна еще более возрастает при добавлении Ti вместе со Sc в расплав. Это приводит к образованию Al₃(Sc,Ti) частиц, которые, видимо, являются даже более эффективными зародышами кристаллизации для Al. [19]

Во-вторых, обладает самым сильным антирекристаллизационным действием, обеспечивающим возможность выпускать все виды полуфабрикатов, в том числе тонкие холоднокатаные листы (до 90 % суммарного обжатия при холодной прокатке), с полностью нерекристаллизованной структурой после нагревов под закалку или отжиг.

Образование Al₃Sc может также происходить при температурах, используемых для гомогенизации, или для термообработки с образованием твердого раствора термообрабатываемых сплавов. Образующиеся частицы Al₃Sc в этих условиях называются дисперсоиды, как правило, обладают слишком низкой численной плотностью, что придает значительную прочность сплаву. Тем не менее, дисперсоиды Al₃Sc очень эффективно препятствуют движению границ зерен в материале. Это приводит к хорошей стойкости к рекристаллизации материала после формовочных операций, таких как прокатка, штамповка и ковка. Нерекристаллизованная структура может улучшить такие свойства, как прочность, пластичность, вязкость и коррозионную стойкость. [18]

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		28

И, в-третьих, характеризуется сильным упрочняющим действием, превосходящим соответствующее действие других известных легирующих компонентов, вводимых в алюминиевые сплавы. Все это вместе взятое обусловило повышенный интерес исследователей, производственников-металлургов, конструкторов к скандию, как к легирующему компоненту в алюминиевых сплавах, и в конечном итоге привело к разработке промышленных алюминиевых сплавов, содержащих скандий, и технологии производства из них деформированных полуфабрикатов, обладающих целым рядом преимуществ. [22]

На рисунке 1.6 показана линия растворимости Sc в алюминии. Максимум растворимости 0,38%. Однако легко получить пересыщенный раствор быстрым охлаждением при кристаллизации. При скорости охлаждения 100 оС/с достигается получение пересыщенного твердого раствора с 0,6 % Sc, а при закалке расплава с использованием вращающегося устройства пересыщение достигает 5 %. Скандий из пересыщенного твердого раствора может выделяться в виде дисперсных частиц Al_3Sc в районе температур 250-350 °С, так что в сплавах, содержащих около 0,1 % Sc возможно значительное дисперсионное упрочнение. Величина упрочнения несколько ниже, чем при старении, но достигает 100 МПа. Наиболее целесообразно использовать Sc для дисперсионного упрочнения нетермообрабатываемых сплавов серии 1xxx, 5xxx и 3xxx.

Рисунок 1.6 – Линия растворимости Sc в алюминии

Одной из перспективных областей применения скандия является легирование алюминиевых литейных и деформируемых сплавов.

В этом случае достигается значительное повышение их технологических и эксплуатационных свойств. [23]

1.4.1 Взаимодействие скандия с алюминием. Особенности строения фазы Al_3Sc

Диаграмма равновесного состояния Sc-Al представлена на рисунке 1.7 Имеется заметная растворимость алюминия в скандии и небольшая растворимость скандия

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		29

в алюминии. Скандий и алюминий образуют между собой 4 химических соединения: Sc_2Al , $ScAl$, $ScAl_2$, $ScAl_3$.

Рисунок 1.7 – Равновесная диаграмма состояния Sc-Al

На рисунке 1.7 представлен участок обобщенной диаграммы Sc-Al со стороны алюминия. Скандий образует с алюминием диаграмму эвтектического типа с ограниченной растворимостью. Температура эвтектического превращения на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже температуры плавления алюминия и составляет $655\text{ }^{\circ}\text{C}$, положение эвтектической точки $0,55\%$ Sc, максимальная растворимость скандия в алюминии $0,35\%$ состав эвтектической точки $0,55\%$. С понижением температуры растворимость скандия в алюминии уменьшается. (см. таблицу 1.7).

Таблица 1.7 – Растворимость скандия в алюминии при разных температурах

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Растворимость скандия в алюминии	
	Мас. %	Атом. %
640	0,31	0,186
620	0,27	0,160
600	0,22	0,134
590	0,19	0,117
580	0,17	0,104
560	0,14	0,086
540	0,11	0,068
520	0,096	0,058
500	0,075	0,045
470	0,054	0,033

Рассмотрение диаграммы состояния Al-Sc позволяет заметить следующие особенности (см. рисунок 1.7).

а) Узкий интервал кристаллизации для доэвтектических сплавов, составляющий несколько градусов, и весьма малый наклон ликвидуса к горизонтальной оси диаграммы.

б) Сравнительно высокая растворимость скандия в алюминии при температуре эвтектического превращения и резкое уменьшение растворимости с понижением температуры.

в) Резкое повышение температуры ликвидуса у заэвтектических сплавов с повышением содержания скандия. [21]

Причины сильнейшего влияния добавки скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов следует искать в особенностях кристаллической решетки фазы Al₃Sc. Из рассмотрения диаграммы Al-Sc видно, что частицы фазы Al₃Sc могут образовываться в 3-х случаях.

1) При первичной кристаллизации при снижении температуры алюминиевого расплава ниже ликвидуса (для заэвтектических сплавов).

2) При эвтектической кристаллизации расплава.

3) При распаде пересыщенного твердого раствора скандия в алюминии (при температурах ниже сольвуса).

Независимо от происхождения все частицы фазы Al₃Sc имеют кубическую кристаллическую решетку типа L12 с постоянной $a=0,410$ нм. Алюминий имеет гранцентрированную кубическую решетку с постоянной $a=0,405$ нм. Коэффициент размерного несоответствия сравниваемых решеток составляет всего лишь 1 %, т.е. кристаллическая решетка фазы Al₃Sc практически полностью соответствует кристаллической решетке алюминия. Эта особенность фазы Al₃Sc обуславливает уникальное по эффективности влияние частиц фазы Al₃Sc на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Первичные частицы фазы Al₃Sc, выделяющиеся при пересечении ликвидуса, являются самыми эффективными (из известных к настоящему времени) модификаторами литой зеренной структуры алюминиевых сплавов. Вто-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		31

ричные частицы фазы Al_3Sc , выделяющиеся при пересечении сольвуса, являются самыми эффективными упрочнителями и антирекристаллизаторами. [22]

1.5 Технология получения деформируемых полуфабрикатов из сплава 01570

1.5.1 Этапы производства алюминия

Технологический процесс производства алюминия включает три основных этапа:

1. Создание глинозема из алюминиевых руд;
2. Создание из глинозема алюминия;
3. Процесс рафинирования алюминия.

И при этом необходимо использование такого оборудования:

- оборудование для системы центральной раздачи глинозема;
- электролизер;
- катодная ошиновка;
- установки сухой газоочистки;
- монтажные, технологические и литейные краны;
- аспирационные установки;
- оборудование литейного цеха;
- оборудование анодно-монтажного цеха;
- металлоконструкции производственных корпусов.

Глинозем можно получить тремя методами: кислотным, щелочным и электролитическим. Самым популярным является щелочной метод.

Суть метода заключается в том, что алюминиевые растворы очень быстро начинают разлагаться при введении гидроокиси алюминия, а раствор, который остался от разложения после выпаривания при интенсивном перемешивании при температуре $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, может снова растворить глинозем, который содержится в бокситах. Данный способ имеет такие главные стадии:

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		32

1. Подготовка боксита, которая подразумевает его дробление и измельчение в специальных мельницах. В мельницы отправляют едкую щелочь, боксит и немного извести. Пульпу, которая получилась, направляют на выщелачивание.

2. Выщелачивания боксита подразумевает его химическое разложение от соединения с водным раствором щелочи. При этом гидраты окиси алюминия при соединении со щелочью в раствор переходят в форме алюмината натрия, а кремнезем, который содержится в боксите, соединяясь со щелочью, в раствор переходит в форме силиката натрия. В растворе эти соединения: алюминат натрия и силикат натрия формируют нерастворимый натриевый алюмосиликат. В этот остаток переходят окислы железа и титана, которые передают остатку красный оттенок. Такой остаток – это красный шлам. Когда растворение полученного алюмината натрия завершается, его разводят водным раствором щелочи при понижении температуры до 100°C.

3. Отделение красного шлама и алюминатного раствора друг от друга происходит благодаря промывке в сгустителях. После чего красный шлам оседает, а оставшийся алюминатный раствор фильтруют.

4. Разложение алюминатного раствора. Его фильтруют и отправляют в крупные емкости с мешалками. Из данного раствора при охлаждении до 60 °C и перемешивании постоянном выделяется гидроокись алюминия. Из-за того что процесс протекает неравномерно и очень медленно, а рост кристаллов гидроокиси алюминия очень важен при дальнейшей обработке, то в эти емкости с мешалками — декомпозиеры ещё добавляют много твердой гидроокиси.

5. Получение гидроокиси алюминия осуществляется в вакуум-фильтрах и гидроциклонах. Большую часть гидроокиси как затравочный материал возвращают к процедуре декомпозиции. После водной промывки остаток отправляется на кальцинацию; и фильтрат тоже возвращается в процесс.

6. Обезвоживание гидроокиси алюминия — завершающая стадия производства глинозема. Она проходит в трубчатых, постоянно вращающихся печах. Сырая гид-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		33

роокись алюминия, когда проходит через печь, полностью высушивается и обезвоживается. [23]

Плавка алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния и других легирующих элементов должна проводиться по возможности в печах, исключающих контакт печных газов с расплавом, с применением защитных флюсов.

Для выплавки алюминия подготавливают шихту и затем производят ее плавку.

После расплавления всех составляющих шихты расплав тщательно перемешивают, снимают шлак с поверхности расплава и отбирают жидкий металл для образцов на экспресс-анализ. Отбор проб рекомендуется производить при температуре 710—740 °С из средней зоны по глубине ванны расплава.

Загрузка шихтовых материалов в печь при приготовлении деформируемых алюминиевых сплавов должна производиться в соответствии с общими правилами и учетом наименьших потерь металла при плавке в виде угара и минимального загрязнения сплава неметаллическими включениями. Наиболее рациональным в этом отношении является следующий порядок загрузки шихты. Сначала в печь загружают чушковый первичный алюминий, потом бракованные слитки, затем отходы первого сорта и рафинированный переплав, затем лигатуры. Медь может быть введена в расплав как в виде алюминиево-медной лигатуры, так и в виде электролитической меди и отходов. [24]

Температура расплава перед введением меди должна быть в пределах 710—750 °С. Легкоокисляющиеся металлы (магний, цинк) вводятся в расплав в чистом виде после полного расплавления всей шихты при температуре расплава 660—720 °С.

Магний вводят в расплав с помощью колокольчика (дырчатой коробки), а цинк — погружают в расплав ложкой.

Перед введением легкоокисляющихся металлов расплав очищают от шлака.

Для обеспечения более равномерного распределения легирующих компонентов после введения каждого из них расплав тщательно перемешивают.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
							34
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		

Технология приготовления деформируемых алюминиевых сплавов, содержащих более 5 % Mg, имеет некоторые особенности вследствие повышенной их окисляемости в жидком состоянии.

1.5.2 Способ получения сверхпластичных заготовок из алюминиевого сплава на основе системы Al-Mg-Sc

Известен способ получения сверхпластичных заготовок из алюминиевого сплава на основе системы Al-Mg-Sc, содержащего, мас.%, 4,5Mg-0,22Sc-0,15Zr, включающий отливку слитка в металлическую изложницу, получение из слитка заготовки квадратного сечения, деформацию заготовки РКУ-прессованием.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к является способ получения сверхпластичных заготовок из алюминиевого сплава на основе системы Al-Mg-Sc, включающий:

- отливку слитка малого размера;
- получение из слитка заготовки круглого сечения;

Решение поставленной задачи достигается тем, что в способе получения сверхпластичных заготовок из алюминиевых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc, включающем отливку слитка, получение из слитка заготовки, деформацию полученной из слитка заготовки РКУ-прессованием с противодавлением, перед отливкой слитка расплав перегревают до температуры 760-800 °С и выдерживают при этой температуре 0,5-1 ч, слиток отливают полунепрерывным литьем в кристаллизатор скольжения, отлитый слиток отжигают при температуре 360-380 °С в течение 3-8 ч, получают из слитка заготовку прямоугольного сечения квадратную в плане с отношением толщины к ширине от 0,17 до 0,33, деформацию полученной из слитка заготовки РКУ-прессованием с противодавлением осуществляют при угле пересечения каналов 90° при температуре 305-325 °С с числом проходов от 4 до 8, что соответствует истинной деформации от 4 до 8, с величиной противодействия, равной 30-40 % от величины приложенного давления, с поворотом заготовки после каждого прохода на 90° относительно оси, перпендикулярной большой грани заго-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		35

товки и проходящей через центр заготовки, затем заготовку подвергают прокатке при температуре предшествующего РКУ-прессования с суммарным обжатием 80-95 % при температуре рабочих валков прокатного стана, равной температуре прокатки. [28]

Технический результат - получение сверхпластичных заготовок с улучшенными показателями сверхпластичности при высоких скоростях пластической деформации. При выдержке в течение 0,5-1 ч перегретого до 760-800 °С расплава повышается степень его гомогенности за счет растворения первичных интерметаллидов, входящих в состав компонентов шихты.

При отливке слитка методом полунепрерывного литья в кристаллизатор скольжения, предусматривающем обязательное интенсивное охлаждение слитка водой, обеспечивается скорость охлаждения металла в интервале температур кристаллизации, позволяющая зафиксировать скандий и цирконий, входящие в состав сплава, в пересыщенном твердом растворе, который распадается при отжиге слитка при 360-380 °С в течение 3-8 ч с образованием дисперсных вторичных когерентных выделений фазы $Al_3(Sc, Zr)$ размером 5-10 нм, тормозящих рост зерен при повышенных температурах.

При РКУ-прессовании при угле пересечения каналов 90° полученной из слитка заготовки прямоугольного сечения квадратной в плане с отношением толщины к ширине от 0,17 до 0,33 при температуре 305-325°С с числом проходов от 4 до 8, что соответствует истинной деформации от 4 до 8, с противодавлением, равным 30-40% от приложенного давления, с поворотом заготовки после каждого прохода на 90° относительно оси, перпендикулярной большой грани заготовки и проходящей через центр заготовки, происходит измельчение зерен и формируется однородная по сечению заготовки структура с размером зерен 1 мкм и их объемной долей 0,9, при этом в материале сохраняются нерекристаллизованные области, представляющие собой участки исходных крупных зерен. [27]

Предлагаемый способ, реализуемый в промышленном производстве, позволяет оптимизировать технологический процесс сверхпластической формовки изделий

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		36

сложной формы из алюминиевых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc за счет сокращения продолжительности формообразующих операций, осуществляемых в режиме высокоскоростной сверхпластичности, а также за счет сокращения времени нагрева заготовки. Сверхпластичные заготовки из алюминиевых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc, получаемые предлагаемым способом, могут быть использованы в качестве конструкционного материала для изделий космической техники.

Способ получения сверхпластичных заготовок из алюминиевых сплавов на основе системы алюминий-магний-скандий, включающий отливку слитка, получение из слитка заготовки, деформацию полученной из слитка заготовки равноканальным угловым прессованием с противодавлением, отличающийся тем, что перед отливкой слитка расплав нагревают до температуры 760-800 °С и выдерживают при этой температуре 0,5-1,0 ч, слиток отливают полунепрерывным литьем в кристаллизатор скольжения, отлитый слиток отжигают при температуре 360-380 °С в течение 3-8 ч, получают из слитка квадратную в плане заготовку прямоугольного сечения с отношением толщины к ширине от 0,17 до 0,33, деформацию заготовки осуществляют равноканальным угловым прессованием с противодавлением при угле пересечения каналов 90° и температуре 305-325 °С с числом проходов от 4 до 8, и с величиной противодействия, равной 30-40 % от величины приложенного давления, с поворотом заготовки после каждого прохода на 90° относительно оси, перпендикулярной большой грани заготовки и проходящей через центр заготовки, затем заготовку подвергают прокатке с суммарным обжатием 80-95 % при температуре предшествующего равноканального углового прессования и температуре рабочих валков прокатного стана, равной температуре прокатки. [29]

1.6 Особенности формирования интерметаллидов в алюминиевых сплавах

Интерметаллиды представляют собой группу сплавов, занимающих промежуточное положение между металлическими и неметаллическими материалами и обладающих уникальным сочетанием физических и механических свойств. Простое определение этому классу материалов, согласно которому интерметаллидами

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			37

именуются соединения металлов, обладающие кристаллической структурой, отличающейся от структуры составляющих их компонентов. К соединениям такого типа относятся как интерметаллидные фазы, так и сплавы с упорядоченной структурой.

В последние десятилетия интерес к интерметаллидам непрерывно возрастает, в том числе и благодаря тому, что материалы этого типа, используемые для изготовления высокотемпературных конструкций, имеют большой потенциал с позиции применения при разработке композиционных материалов конструкционного назначения.

1.6.1 Особенности взаимодействия компонентов сплавов с образованием интерметаллидных фаз

В сталях и сплавах, легированных элементами, образующими интерметаллидные фазы, или имеющих в составе значительные количества углерода можно наблюдать на нетравленных шлифах выпуклые (обычно блестящие) частицы, представляющие собой карбиды (TiC, NbC, WC и др.) или интерметаллиды (FeCr, Ni₃Al, Ni₃Ti, Fe₂W и др.). Высокая твердость карбидов и интерметаллидов приводит к тому, что при длительной полировке шлифа очертания этих включений становятся очень четкими. Они хорошо видны на нетравленных шлифах при рассмотрении с небольшими смещениями фокуса. В темном поле карбиды и интерметаллиды выглядят черными, так как они непрозрачны. Форма включений округлая или эвтектическая и они располагаются резко выраженными ликвационными полосками (в деформированном металле). Горячая механическая обработка приводит к строчечному расположению включений и к некоторой коагуляции вследствие высокотемпературного нагрева.

Приведенные особенности (коагуляция при нагреве, высокая твердость, непрозрачность и др.) позволяют отличать карбиды и интерметаллиды от включений. Одним из способов установления природы этих включений может служить применение высокотемпературного нагрева шлифа (вплоть до 1400 °C). Растворение включений или их коагуляция при таком нагреве, а также выпадение их в виде эв-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		38

тектики свидетельствуют о карбидном или интерметаллидном происхождении включений. [30]

Интерметаллид - это соединение двух или нескольких сплавов металлов в единый элемент. Осуществляется это за счет внешнего воздействия на исходные компоненты на специальном оборудовании несколькими способами, а именно:

- посредством взаимной диффузии двух, трех или более веществ;
- при термической обработке;
- при перемещении части одной части твердого раствора в другой;
- за счет механической обработки и распаде насыщенного раствора;
- применяя пластическую деформацию.

Интерметаллиды отличаются не совсем обычными химическими связями. Дело в том, что в зависимости от состава и характеристик каждого из первоначальных составляющих, складывается жесткость и прочность их кристаллических решеток.

Характеристика этих сплавов заметно отличается от состава первичных металлов, которые послужили основой. Фактически образуется не одно, а несколько соединений в одном «флаконе». Причем новое вещество вобрало в себя все характеристики первоначальных материалов, которые в новой структуре в некоторых случаях имеют более выраженный характер. Чем исходные компоненты более различаться по своим химическим и физическим параметрам, электроотрицательности тем более прочные будут межкристаллические связи в конечном продукте. Кроме того, в них обязательно будет присутствовать значительный экзотермический эффект. Основной параметр, провоцирующий возникновение определенного структурного типа для этих сплавов - отношение радиусов компонентов. [31]

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		39

2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материал исследования

При выполнении опытно конструкторских работ по разработке ракетных конструкций из сплава 01570 на одном из предприятий Красноярского края был проведен ультразвуковой контроль заготовок одной партии (УЗК) с последующим рентген контролем (РК), при котором на одной из заготовок были обнаружены дефекты в виде белых пятен, предположительно включений интерметаллидов.

Было проведено исследование, направленное на выявление зависимости, как интерметаллиды во фрагменте исследуемого образца влияют на структуру и прочностные свойства сплава 01570 до и после аргодуговой сварки.

В качестве объекта исследования использовали 2 прутка Ø30 мм из деформируемого термически неупрочняемого сплава на основе алюминия марки 01570.

Химический состав исследуемого сплава, согласно ГОСТ 4784-2019 представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Массовая доля элементов

В процентах

Cr	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sc	Be	Zr	Al
н.б.	н.б.	н.б.	0,2	3,0	н.б.	0,01	0,17	0,0002	0,05	основа
0,2	0,3	0,1	0,6	6,3	0,1	0,05	0,27	0,005	0,15	

2.2 Методика исследования

2.2.1 Проведение УЗК и РК заготовок

На одно из стратегических предприятий Красноярского края поступила партия заготовок. Заготовки представляют собой прутки Ø30 мм из деформируемого термически неупрочняемого сплава на основе алюминия марки 01570.

Проведение ультразвукового контроля является обязательным этапом в производстве особо ответственных изделий, на которые в процессе использования ло-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР				Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата					40

жатысь большыя нагрэзкі, па гэтым данныя заготовки паводле ГОСТ 21120-75 падвергнулі ультразвуковаму кантролю (УЗК).

Ультразвуковы кантроль — паказвае дэфекты, залёгаючыя ў талшыні металу. На прыборы трэба ўсталяваць адпаведныя алюмінію скорасць распаўсюджвання хвалы і вугал вводу для нахільных п'езоэлементаў. Додзіць радыаграфічны метод кантроля. УЗК таксама прымяняецца для вызначэння газовай парыстасці ўсяго вырабы ў цэлым і вымярэння талшыні.

Адным з недастакаў УЗК з'яўляецца неабходнасць тэраўнай падрыхтоўкі паверхнасці перад правядзеннем кантроля. Трэба стварыць шэрохаватасці пятога класа. Яны неабходныя для добрага кантакта з жідкай масай, якая наносіцца для таго, каб УЗ-хвалы беспрэпятна пранікалі ўнутр. Паміма гэтага, УЗК не дазваляе атрымаць дакладную інфармацыю аб памерах дэфекта.

В выніку гэтага неабходна правесці дадаткова радыаграфічны кантроль, пры якім выяўляюць паверхнасныя, падпаверхнасныя, ўнутраныя і сквозныя дэфекты, ў тым ліку мелкія.

Радыаграфічны кантроль праводзіцца паводле ГОСТ 7512-82.

В выніку даследавання быў выяўлены зразок з уключэннямі белага колера — зразок №1. Для параўнання, як данныя уключэнні ўплываюць на трываласць заготовки, быў выбран зразок №2 без данных уключэнняў.

2.2.2 Механічныя выпрабаванні зразкаў да аргона-дуговага зваркі

Паводле схем вырэзкі зразкаў з штамповак былі вырэзаны зразкі і праведзены механічныя выпрабаванні з вызначэннем σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ ў статычным рэжыме нагрэжэння ў ўмовах камнатнай тэмпературы паводле ГОСТ 1497-84.

2.2.3 Аргона-дуговая зварка зразкаў

Пасля гэтага зразкі падвергнулі аргона-дуговага зваркі, вырэзалі фрагмент зварнага шва і падрыхтавалі мікросліфы для механічных выпрабаванняў і структурнага даследавання.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Ліст
							41
Ізм.	Ліст	№ дакум.		Подп.	Дата		

Метод аргонодуговой сварки был выбран так как аргон практически не вступает в химические взаимодействия с расплавленным металлом и другими газами в зоне горения дуги. Будучи на 38 % тяжелее воздуха, аргон вытесняет его из зоны сварки и надежно изолирует сварочную ванну от контакта с атмосферой. Основная область применения аргонодуговой сварки неплавящимся электродом – соединения из легированных сталей и цветных металлов. Способ сварки обеспечивает хорошее качество и формирование сварных швов, позволяет точно поддерживать глубину проплавления металла, что очень важно при сварке тонкого металла при одностороннем доступе к поверхности изделия. Сварка неплавящимся электродом – один из основных способов соединения титановых и алюминиевых сплавов.

При сварке опытных образцов придерживались следующей последовательности проведения операций. Для начала заготовки из плоского проката толщиной 3 мм обезжиривали ацетоном, чтобы удалить с поверхности остатки жиров и масел. Затем подготавливали кромки свариваемых заготовок и удаляли оксидную пленку с торцов пластин ручным гравером, а из зоны воздействия сварочной дуги шабрением. Для более интенсивного и равномерного теплоотвода от образцов во время сварки в качестве подложки использовали медную пластину, которую так же обезжиривали ацетоном для формирования хорошего контакта. Подготовка проволоки заключалась в обработке проволоки ручной фрезой и шабрением. На сварку одного образца шириной 5 мм использовали 15 - 20 см проволоки диаметром 3 мм. Подготовка образцов и проволоки к сварке проводилась таким образом, чтобы время с начала зачистки до начала сварки составляло не более 20 мин. Сборку образцов на медной подложке проводили таким образом, чтобы торцы свариваемых деталей находились на одной оси с центром канавки, предназначенной для формирования обратного валика. Заготовки для сварки собирались без зазора (впритык). Для обеспечения хорошего равномерного контакта заготовок с подложкой и надежного позиционирования заготовок относительно подложки необходимо использовать прижимы либо другие подручные средства.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		42

Сварка производилась по технологии TIG-AC с использованием сварочного аппарата TIG200P в защитной среде с использованием лантанированного вольфрамового электрода WL- 15 диаметром 2,4 мм.

2.2.4 Механические испытания образцов после аргоно-дуговой сварки

Согласно схемам вырезки из заготовок были вырезаны образцы и проведены механические испытания с определением σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ в статическом режиме нагружения в условиях комнатной температуры по ГОСТ 1497-84.

Испытания проводили полностью в автоматическом режиме на электромеханической универсальной испытательной машине «Instron 5585H», снабжённой автоматическим цифровым устройством для определения степени деформации твердых тел (экстензометром) высокого разрешения. Для нагрева образцов при испытании на захваты разрывной машины устанавливалась электрическая печь сопротивления. По результатам испытаний рассчитывался предел прочности и предел текучести, а относительное удлинение и сужение определяются по показаниям экстензометра. Значение испытываемой величины определяли, как среднее арифметическое минимум из трёх образцов «на точку». Температурный интервал испытаний составлял 350...550 °С с шагом 25...50 °С.

Поверхность излома исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа фирмы JEOL JSM-6460 LV в лучах вторичных электронов при увеличениях от 100 до 3000 раз.

Химический состав частиц и связи между ними определялся на основании микрорентгеноспектрального анализа с применением специальной приставки – энергодисперсионного анализатора фирмы Oxford Instruments.

Рисунок 2.1 – Поверхность излома образца 400 при увеличении $\times 100$, $\times 500$

Микрофрактографические исследования образцов показали (рисунок 2.1), что изломы испытанных образцов имеют ямочное дулексное строение, характерное

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		43

для вязкого транскристаллитного разрушения. В изломе наблюдается волокнистая структура.

Основная часть поверхности излома покрыта мелкими ямками, в которых иногда можно наблюдать разрушенные частицы интерметаллидов $Al_3(Sc,Zr)$ (таблицы 2.2, 2.3). Сравнительно небольшую долю поверхности излома занимают крупные ямки, в которых встречаются крупные частицы.

При помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6460LV выполнен анализ химического состава твердого раствора и присутствующих частиц.

Рисунок 2.2 – Разрушенные частицы интерметаллидов

Таблица 2.2 – Химический состав разрушенных частиц

Спектр	Mg	Sc	Ti	Zr	Al
Спектр 1	0,91	19,11	1,13	13,19	основа
Спектр 2	0,38	16,89	0,95	17,27	основа

Рисунок 2.3 – Разрушенные частицы интерметаллидов

Таблица 2.3 – Химический состав разрушенных частиц

Спектр	Mg	Sc	Ti	Zr	Fe	Mn	Al
Спектр 3	6,53	0,33	-	-	-	0,41	основа
Спектр 4	-	19,33	1,02	17,92	-	-	основа
Спектр 5	26,76	-	-	12,23	-	-	основа

Спектр 3 представляет собой алюминий–магниевый твердый раствор Al_3Mg_2 . Спектр 4, 5, 6 интерметаллиды $Al_3(Sc,Ti)$, $Al_3(Sc,Zr)$, Al_3Sc .

2.2.5 Исследование микроструктуры

Оценка микроструктуры проводилась согласно ГОСТ 8233 – 86. Подготовку шлифов к работе на микроскопе проводили по общепринятой методике, которая включала подготовку гладкой полированной поверхности, травление шлифов в двадцатипроцентном водном растворе азотной кислоты.

Согласно схемам вырезки образцов из штамповок были вырезаны образцы для металлографического исследования.

Поверхность образцов готовили шлифовкой, полировкой и травлением.

Первоначально образец подвергался шлифовке на наждачной бумаге, использовалась бумага с различной зернистости, с постепенным переходом от более крупного к более мелкому. Бумага использовалась по ГОСТ 6456-75 на бумажной основе с номерами зернистости. Перед переходом к каждому последующему номеру бумаги удаляли остатки спиртом, а направление шлифовки меняли на 90°. [32]

Для полировки использовали плотную бумагу и алмазные пасты разной зернистости. Переход алмазной пасты от крупных абразивных частиц к мелкому, происходит, как только появится зеркальный блеск и отсутствие рисок. Полировка считается законченной, когда поверхность имеет зеркальный блеск и не имеет рисок.

Затем с помощью микроскопа при увеличении 500 крат отыскивали видимые интерметаллиды. Зоны с обнаруженными, выходящими на поверхность образца интерметаллидами выделяли путём их обкалывания с помощью микротвёрдомера для дальнейшего облегчения поиска найденных интерметаллидов.

Приготовленные таким образом образцы травили в щелочной ванне. Длительность каждого цикла травления образца составляла 10 секунд до набора суммарного времени, равного одной минуте, и 30 секунд до набора времени, равного двум минутам (всего 8 циклов травления). После каждого цикла травления проводилась стандартная промывка в тёплой и холодной воде. На рисунке 2.4 показана выделенная зона поверхности исходного образца с интерметаллидами. На фотографии чётко видны отпечатки пирамиды микротвёрдомера, которые в дальнейшем позволят безошибочно идентифицировать этот участок (видимые интерметаллиды помечены стрелками).

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		45

Рисунок 2.4 – Исходная поверхность образца из сплава 01570 с выделенной зоной, содержащей интерметаллиды

Таким образом, было проведено исследование, направленное на выявление зависимости влияния интерметаллидов на структуру и прочностные свойства сплава, при помощи структурных исследований и ультразвукового контроля.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
							46
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Результаты механических испытаний

Результаты механических испытаний с определением σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ в статическом режиме нагружения в условиях комнатной температуры по ГОСТ 1497-84 до аргонодуговой сварки и после приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты механических испытаний до и после аргонодуговой сварки

№ Образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Образец №1 (до сварки)	480	400	13
Образец №1 (после сварки)	470	390	13
Образец №2 (до сварки)	500	430	15
Образец №2 (после сварки)	500	420	15

Из анализа таблицы 3.1 видно, что предел прочности (σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), относительное удлинение (δ) незначительно меньше у образца №1 с включениями интерметаллидов. Так же можно сделать вывод, что термическое воздействие в результате аргоно-дугой сварки незначительно влияет на прочностные характеристики сплава 1570.

3.2 Результаты исследования микроструктуры

Микроструктура образца №1 представляет собой альфа твердый раствор + мелкокораздробленная интерметаллидная фаза, удовлетворительная для сплава 01570. Интерметаллиды преимущественно имеют округлую форму и размер от 0,001 до 0,016 мм, распределены равномерно по всему образцу. В отмеченной зоне обнаружен участок с повышенной травимостью за счет неравномерностью распределе-

ния включений упрочняющей фазы в твердом растворе (рисунок 3.1, рисунок 3.2, рисунок 3.3)

Рисунок 3.1 – Граница белого пятна, $\times 200$

Рисунок 3.2 – Микроструктура основного металла, $\times 200$

Рисунок 3.3 – Микроструктура в белом пятне, $\times 200$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор сплавов системы Al–Mg–Sc дает возможность обеспечения достаточно высокого уровня прочностных свойств без применения трудно реализуемой на практике упрочняющей термической обработки (закалки и старения) крупногабаритных деталей.

Опыт практического производства и применения показал, что удорожание полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием, по сравнению со стоимостью полуфабрикатов, не содержащих его, составляет 60–80 %. Такое удорожание компенсируется увеличением запаса прочности и существенным снижением веса конструкций летательных аппаратов. В итоге конструкции летательных аппаратов из сплава оказываются дешевле сопоставимых по целевой эффективности.

В данной дипломной работе проведены исследования основных закономерностей формирования структуры и свойств сплава системы алюминий–магний–скандий 01570. Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

– исследовано влияние включений интерметаллидов на прочностные свойства сплава 01570 до и после аргодуговой сварки;

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		48

- установлено, что высокотемпературное воздействие вследствие аргоно-дуговой сварки не влияет на механические свойства сплава;

– выявлено, что интерметаллиды незначительно влияют на прочностные свойства сплава 01570;

– установлено, что необходимо контролировать количество интерметаллидов в заготовках, с помощью ультразвукового контроля и рентген контроля. Это позволит избежать негативного воздействия на механические свойства сплавов, так как интерметаллиды являются концентраторами напряжений и в дальнейшем могут понести за собой негативные последствия.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
							49
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бронз А.В. Сплав 1570С — Материал для герметичных конструкций перспективных многофазовых изделий РКК «Энергия»/А. В. Бронз, В. И. Ефремов, А. Д. Плотников, А. Г. Чернявский/ Космическая техника и технологии. – 2014. – № 4. – С. 62-67.

2. Шачнев С. Ю. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов 1570С, АМг6 большой толщины для использования в перспективных разработках РКК «Энергия»/ С. Ю. Шачнев, В. А. Пащенко, И. Д. Махин, А. В. Базескин, А. Д. Дубовицкий/ Космическая техника и технологии. – 2016. – №4. – С. 24-30.

3. Технология конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): учебник для вузов: в 4 ч. под общей ред. Э.М. Соколова С.А. Васина, Г.Г. Дубенского.- Тула: Изд-во ТулГУ.2007. Ч. 1. Машиностроительные материалы / Е.М. Гринберг, Г.В. Маркова, В.А. Алферов;- 475 с.

4. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов; под ред. Б.Н. Арзамасова и Г.Г. Мухина -. 6-е изд., стер. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004.- 648 с.

5.Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд./ Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М.и др.: 2-е изд.,перераб. и доп. -М.: Металлургия, 1984. - 528 с.

6. Ковалев Д.С. Технологические особенности алюминиевых сплавов 1201 и 01570/ Ковалев Д.С., Шахов В.Н., Богданов В.В./Актуальные проблемы космонавтики. – 2014. – № 10. – С. 104-105.

7. Белов, А.Ф. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов. Справочник. 2-е издание переработанное и дополненное / А.Ф. Белов, В.И. Добаткин, Ф.И. Квасов, И.Н. Фридляндер [и др.] - Москва: «Металлургия», 1985. - 338 с.

8. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов. Справочное руководство. Редакционная коллегия И.В. Горынин и др. Москва "Металлургия", 1998.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		50

9. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые.
10. Филатов, Ю.А. Исследование и разработка новых высокопрочных свариваемых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc и технологических параметров производства из них деформированных полуфабрикатов: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.16.01 / Филатов Юрий Аркадьевич. М., 2000. – 50 с.
11. Филатов, Ю.А. Развитие представлений о легировании скандием сплавов Al-Mg / Ю.А. Филатов // Технология легких сплавов. - 2015. - № 2. - С. 19-22.
- 12.Высокоскоростная сверхпластичность нанокристаллического алюминиевого сплава 01570 / В.Н. Перевезенцев, М.Ю. Щербань, М.Ю. Мурашкин [и др.] // Письма в «Журнал технической физики». – 2007. – Т. 33. - № 15. – С. 40-46.
13. Микляев, П.Г. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов: справочник / П.Г. Микляев, В.М. Дуденков. - Москва: Металлургия, 1979. – 182 с.
14. Бережной, Н.Н. Исследование очага деформации при продольном прокатывании с точки зрения реологической концепции / Н.Н. Бережной, В.А. Чубенко, А.А. Хиноцкая, С.О. Мацишин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 1/7(73). – С. 31-35.
15. Никитин, Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки / Г.С. Никитин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 399 с.
17. Закономерности легирования алюминия и алюминиевых сплавов скандием. Промышленные алюминиевые сплавы, содержащие скандий: Обзор литературных данных. – Москва, 1994. - 99 с.
18. Александров, И.В. Аналитическое моделирование напряжения течения сплава 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации / И.В. Александров, Р.Г. Чембарисова, М.И. Латыпов // Вестник УГАТУ. Т. 16, (48). - 2010. – № 3. - С. 115–125.
19. Филатов, Ю.А. Исследование и разработка новых высокопрочных свариваемых сплавов на основе системы Al-Mg-Sc и технологических параметров произ-

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		51

водства из них деформированных полуфабрикатов: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук / Ю.А. Филатов. – Москва, 2000. - 180 с.

20. Корягин, Ю.Д. Структура, свойства и термическая стабильность легких сплавов и сталей, подвергнутых деформационной и термомеханической обработкам: дисс. д-ра техн. наук / Ю. Д. Корягин. – Челябинск, 2003. - 320 с.

21. Даммер, А.Э. Исследование и совершенствование штамповки в условиях сверхпластичности поковок из легких сплавов / А.Э. Даммер, В.И. Бухмастов, Е.В. Эжк // Отчет о НИР (заключ.). – Челябинск: ЧПИ имени Ленинского Комсомола, 1986. -109 с.

22. Захаров, В.В. О совместном легировании алюминиевых сплавов скандием и цирконием / В.В. Захаров //Металловедение и термическая обработка металлов. - 2014. - № 6. - С. 3-8.

23. Фридляндер, И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе / И.Н. Фридляндер // ВИАМ. – 2002. – 19 с.

24. Луц, А.Р. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / А.Р. Луц, А.А. Суслина. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. - 81 с.

25. Автократова, Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е.В. Автократова // Научные сообщения УГАТУ. - 2001. – С. 182-183.

26. Ковалёв, Д.С. Технологические особенности алюминиевых сплавов 1201 и 01570 / Д.С. Ковалёв, В.Н. Шахов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2014. Технические науки. – Железногорск: Изд-во СибГАУ, 2014. – С. 10-15.

27. Скачков, В.М. Химическое легирование скандием, цирконием и гафнием сплавов на основе алюминия: автореферат дисс. ... канд. хим. Наук / В.М. Скачков. –Екатеринбург, 2013. – 47 с.

28. Калинина, Н.Е. Особенности модифицированных алюминиевых сплавов системы Al-Mg. / Н.Е. Калинина, З.В. Вилищук, В.Т. Калинин // Авиационно- космическая техника и технология. - 2011. - №7. – С. 80-83.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		52

29. Черкасов, В.В. Особенности формирования структуры и свойств литейных Al–Mg-сплавов, легированных скандием / В.В. Черкасов, П.П. Побежимов // ВИ-АМ. – 1996. – 11 с.

30. Лукин, В.И. Sc–перспективный легирующий элемент для присадочных материалов / В.И. Лукин // ВИАМ. – 1995. - 7 с.

31. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. - М: Изд-во стандартов, 1984 - 24 с.

32. СТО ЮУрГУ 19–2008 Стандарт организации. Выпускная квалификационная научно-исследовательская работа студента

33. Филатов, Ю. А. Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc / Ю. А. Филатов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1996. - № 6. - С. 33–36.

34. Белов, Н.А. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия. / Н.А. Белов, А.Н. Алабин // Цветные металлы. – 2007. – № 2. – С. 99-106.

35. Напалков, В.И. Легирование и модифицирование алюминия и магния / В.И. Напалков, С.В. Махов. – М.: «МИСИС», 2002. – 376 с.

36. Казанцев, В.П. Перспективы извлечения скандия из растворов подземного выщелачивания минерального сырья / В.П. Казанцев, А.Р Бекетов, Ю.П. Кудрявский // Цветная металлургия. – 2009. – № 1. – С. 37-41.

37. Фридляндер, И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. / И. Н. Фридляндер // Технология легких сплавов. - 2002. - № 4. – С. 12–17.

						22.04.02.2020.850.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата		53