

На правах рукописи



ЯКИВЬЮК Ольга Викторовна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ
Al-Mg, ЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ, И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск–2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Сидельников Сергей Борисович**

Официальные оппоненты:

Белов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Тулупов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)», г. Самара.

Защита состоится 19 декабря 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10

Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный уровень развития научно-технического прогресса металлургической и машиностроительной отраслей предъявляет повышенные требования к качеству слитков, полуфабрикатов и конечных изделий из алюминиевых сплавов. Особое место занимают сплавы системы Al-Mg, которые характеризуются сочетанием удовлетворительной прочности, сравнительно высокой пластичности, хорошими литейными, коррозионными свойствами и свариваемостью, а уровень прочности этих сплавов в значительной мере зависит от содержания в них основного легирующего компонента – магния.

Деформированные полуфабрикаты из этих сплавов в виде листов, плит, поковок, профилей и сортового проката, благодаря уникальному сочетанию их функциональных свойств, широко используются в судо-, авиа- и автомобилестроении. Задача поиска технологий производства таких полуфабрикатов из известных или новых свариваемых деформируемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, обладающих высокими показателями прочности и коррозионной стойкости, является актуальной в связи с необходимостью повышения весового совершенства крупногабаритных конструкций, которые находятся в сложнапряженном состоянии и подвергаются воздействию коррозионной среды, а также знакопеременным нагрузкам.

На современном этапе развития техники большое внимание уделяется изучению комплексного легирования сплавов переходными (ПМ) и редкоземельными металлами, такими как Sc, Zr и др., и их влияния на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов. Такие металлы оказывают эффективное легирующее и модифицирующее действие на структуру сплавов. Комплексно легированные алюминиевые сплавы, наряду с сохранением достоинств алюминия, обладают значительно более высокой прочностью и требуемыми эксплуатационно-технологическими характеристиками: сочетают малую плотность и высокую прочность, что способствует их широкому использованию во многих отраслях народного хозяйства.

В 2014-2015 гг. сотрудниками ОК РУСАЛ проведен ряд исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание технологии получения лигатуры Al-Sc собственного производства и новых сплавов с ее применением. Высокий уровень свойств сплавов со скандием делает их перспективным материалом для промышленности, так как они имеют высокий уровень механических свойств, повышенную коррозионную стойкость, а сварные соединения этих сплавов характеризуются самой высокой прочностью. Применение сплавов со скандием в настоящее время сдерживается их сравнительно высокой стоимостью. Однако необходимость снижения массы и металлоемкости конструкций позволяет прогнозировать их широкое применение в недалеком будущем. В связи с этим актуальной задачей для развития этого направления является поиск составов и получение сплавов с минимальным содержанием скандия, что позволит снизить себестоимость их производства и расширить рынок сбыта.

Данная работа выполнялась при реализации проекта 03.G25.31.0265 «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al-Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» в рамках Программы комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218.

Степень разработанности темы. В трудах таких ученых, как В.М. Белецкий, Н.А. Белов, А.А. Бочвар, И.Н. Ганиев, Ю.А. Горбунов, О.Е. Грушко, В.И. Добаткин, Н.Н. Довженко, М.Е. Дриц, В.И. Елагин, В.В. Захаров, В.С. Золоторевский, Е.Н. Каблов, К. Киплинг, В.Л. Колмогоров, В.И. Напалков, Г.Д. Никифоров, И.И. Новиков, В.В. Овчинников, П.П. Побежимов, В.К. Портной, Дж. Рэйсет, Ю.А. Филатов, И.Н. Фридляндер, Дж. Хэтч, А.И. Целиков, Г.И. Эскин и др. во всем многообразии представлена информация об особенностях изменения структуры, фазового состава, напряженно-деформированном состоянии металла и механических свойствах алюминиевых сплавов в процессах литья и деформационно-термической обработки. Однако, несмотря на это внедрение новых сплавов с повышенными механическими и коррозионными свойствами, расширение сортамента продукции, модернизация оборудования и ужесточение требований по уровню эксплуатационных характеристик изделий, обуславливает необходимость поиска новых составов сплавов, корректировки деформационных режимов и параметров термической обработки.

Целью диссертационной работы является создание комплекса технических и технологических решений для повышения эффективности технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg, легированных скандием.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработка нового алюминиевого сплава на основе системы Al-Mg, экономно легированного скандием, с заданным комплексом механических и коррозионных свойств;
- проведение компьютерного моделирования процесса горячей листовой прокатки крупногабаритных слитков в программном пакете DEFORM-3D с учетом реологических характеристик нового сплава;
- расчет режимов горячей и холодной прокатки для получения листовых полуфабрикатов в лабораторных и промышленных условиях;
- проведение экспериментальных исследований по получению деформированных полуфабрикатов по предложенным технологическим режимам обработки;
- разработка технологии и исследование свойств сварочной проволоки из исследуемых сплавов;
- проведение исследований структуры, механических и коррозионных свойств деформированных, сварных и отожженных полуфабрикатов из нового сплава;

– проведение опытно-промышленного опробования технологий производства деформированных полуфабрикатов и определение их механических и коррозионных свойств.

Научную значимость имеют следующие результаты.

1. На основе изучения влияния переходных металлов на структуру и свойства сплавов системы Al-Mg предложен новый сплав, экономно легированный скандием, характеризующийся высоким уровнем механических и коррозионных свойств.
2. Получены новые данные по реологическим свойствам сплавов системы Al-Mg, с различным содержанием скандия, в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров обработки.
3. С использованием результатов компьютерного моделирования обоснованы технологические параметры процесса, определены усилия и моменты, и установлены закономерности их изменения при горячей листовой прокатке крупногабаритных слитков из исследуемых сплавов.
4. Установлены закономерности изменения механических свойств листового проката из исследуемых сплавов, полученного горячей и холодной прокаткой в лабораторных и промышленных условиях, в зависимости от деформационных и температурно-скоростных условий обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Создана компьютерная 3D модель процесса горячей прокатки длинномерных деформированных полуфабрикатов, применение которой позволяет определить деформационные режимы и энергосиловые параметры для промышленных условий обработки крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов.
2. Разработаны технические условия на катаные полуфабрикаты и технология прокатки крупногабаритных слитков из нового сплава, экономно легированного скандием, с использованием которых в промышленных условиях получены опытные партии листов и рулонов с требуемым уровнем механических и коррозионных свойств.
3. Разработаны и защищены патентами РФ технические решения по конструкции установок и технология совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов, с применением которых получены опытные партии сварочной проволоки для изготовления сварных соединений листового металла из нового сплава.
4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», а также аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Методология и методы исследований базируются на основных законах термодинамики и теории обработки металлов давлением с применением современных методик металлографического анализа и численного моделирования с использованием программного комплекса DEFORM 3D.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований реологических свойств алюминиевых сплавов системы Al-Mg, с различным содержанием скандия, в том числе экономно легированного;
- результаты компьютерного моделирования процесса горячей прокатки крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов, легированных скандием;
- технологические решения для получения листового проката из нового алюминиевого сплава, экономно легированного скандием, позволяющие изготовить продукцию с требуемым уровнем механических и коррозионных свойств;
- технологические решения для получения длиномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов, легированных скандием, с применением методов совмещенной обработки, позволяющие изготовить проволоку с требуемым уровнем эксплуатационных свойств для сварки листового проката из нового алюминиевого сплава, экономно легированного скандием.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов доказана применением научно обоснованных методов исследований, компьютерного моделирования и обработки результатов; соответствием результатов исследований, полученных автором, с результатами других исследователей в этой области; практической реализацией полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на ежегодной Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Проспект Свободный» (Красноярск, 2016-2018 гг.), XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2017 г.), Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2016-2017 гг.), Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2016-2018 г.), 3-ей международной научно-практической молодежной конференции «Magnitogorsk Rolling Practice» (Магнитогорск, 2018 г.), международной конференции MEFORM 2018 (г. Фрайберг, Германия, 2018 г.) и др.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 12 печатных трудах и тезисах докладов, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях и 2 патентах РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 156 источников, и пяти приложений. Основной материал изложен на 149 страницах, включая 65 таблиц и 61 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены области применения сплавов на основе системы Al-Mg, технологии получения деформированных полуфабрикатов и их типичные свойства. Проведен анализ научных работ, посвященных повышению механических

свойств за счет легирования алюминиевых сплавов переходными и редкоземельными металлами, в частности скандием и цирконием. Описано влияние легирующих элементов на свойства и структуру сплавов системы Al-Mg. На основании проведенного анализа сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведены результаты моделирования процесса горячей прокатки длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов Al-Mg-Sc. Проведена оценка формоизменения металла, температуры раската и энергосиловых параметров горячей листовой прокатки с помощью пакета DEFORM-3D.

Анализ научно-технической и патентной литературы выявил недостатки известных сплавов системы Al-Mg-Sc, основными из которых являются либо низкие прочностные свойства, либо чрезмерно высокая себестоимость продукции из них из-за большого содержания дорогостоящего скандия. В связи с этим решалась задача получения деформированных полуфабрикатов из алюминий-магниевого сплава, который отличается от известных тем, что он содержит комплекс легирующих элементов, обеспечивающих высокие прочностные, пластические и коррозионные свойства при минимальном содержании скандия 0,10-0,12 масс. % (сплав 1). Для сравнительной оценки технологичности обработки и свойств данного сплава использовали сплав 01570 (сплав 2), в котором содержание скандия находится в пределах 0,25-0,35 масс. % согласно ТУ 1-809-420-2007.

На первом этапе исследований с помощью программного пакета DEFORM-3D было проведено моделирование процесса горячей прокатки крупногабаритных слитков сечением 300×1400 и 445×1400 мм на СГП Кварто 2800 (табл. 1). По результатам моделирования анализировали изменения геометрии раската, изучали температурные условия и напряженно-деформированное состояние металла, а также оценивали причины разрушения проката в прикромочной области.

Таблица 1 – Данные для моделирования процесса горячей прокатки

Наименование параметра	Значение	
Диаметр рабочих валков, мм	700	965
Длина бочки валка, мм	2800	2885
Начальная температура слитка, °С	425	410
Скорость прокатки, м/с	1,0 - 5	0,5 - 2
Размеры слитка, мм	300×1400×1700	445×1400×4000
Толщина проката, мм	80	8
Технологические паузы между проходами, с	10 - 30	10 - 15

При формулировании условий моделирования были учтены реологические свойства металла, материал валков, температурно-скоростные параметры деформации, показатель трения и конвекционный теплообмен. Количество элементов модели составляло от 100 до 180 тыс. Кроме того учтено, что в первых проходах не рекомендуется применять скорость прокатки больше 1,0–1,2 м/с, особенно при больших обжатиях, так как вследствие интенсивного налипания значительная часть наружной поверхности полосы может покрыться трещинами.

При дальнейшей обработке величина обжатия лимитируется только углом захвата и величиной сил, возникающих при прокатке. Поэтому обжатия по пропускам распределяли таким образом, что в начале прокатки они были равны 8-10 %, а затем по мере дробления литой структуры и возрастания пластичности раската их увеличивали до 45-50 %.

На рис. 1 приведены некоторые результаты моделирования, которые подтвердили, что изменение геометрии раската (рис. 1, *а*) характерно для прокатки металла в промышленных условиях при тех же режимах обработки, при этом более интенсивное обжатие валками поверхностных слоев по сравнению с центральными приводит к неравномерности деформации металла, различным скоростям их истечения и появлению растягивающих напряжений.

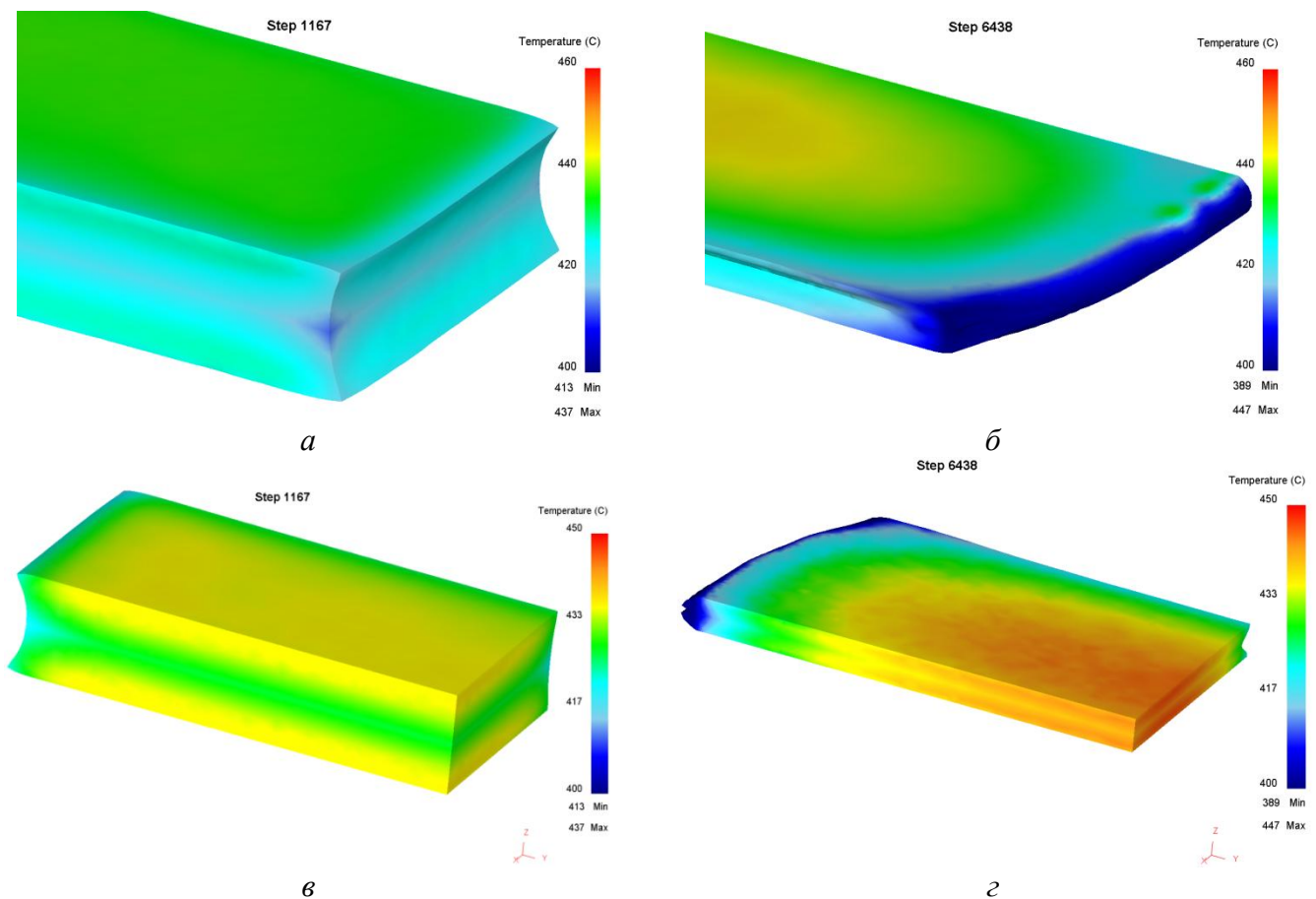


Рисунок 1 – Форма раската и распределение температуры по его поверхности (*а*, *б*) и сечению (*в*, *г*) после проходов: *а*, *в* - №4; *б*, *г* - №16

Установлено, что распределение температуры по поверхности раската весьма неравномерно (рис. 1, *б*), при этом температура его боковой и передней кромок ниже, чем поверхности металла на контакте с валками, то есть областями с минимальной температурой являются кромки раската.

Анализ распределения температур по объему раската показал, что поверхностные слои за счет более интенсивной деформации разогреваются до более высоких температур. Кроме того, на крупногабаритных слитках центральные слои в процессе деформации в первых проходах практически не разогреваются (рис. 1, *в*).

По мере уменьшения толщины раската температура по сечению выравнивается (рис. 1, 2).

Распределение температур в объеме раската коррелирует с распределением накопленной интенсивности деформации по продольному и поперечному сечению раската. Минимальная деформация накоплена в середине заготовки и растёт вплоть до максимального значения на поверхности заготовки. В первых проходах она локализована в приповерхностных слоях и не распространяется до центра раската. С уменьшением толщины заготовки до 80 мм к последнему проходу деформация распространяется на всю толщину раската.

Анализ распределения напряжений в очаге деформации по проходам показывает наличие, особенно в первых проходах, значительных растягивающих напряжений в металле в зонах перед входом и на выходе из очага деформации, а также в центре раската и на его боковых кромках. Значения критерия разрушения Кокрофта-Латама наиболее велико на кромках раската, что подтверждает наличие растягивающих напряжений в этой области и возможность возникновения трещин при дальнейшей прокатке.

В третьей главе описана методика проведения исследования, отражены результаты расчета режимов обжатий горячей и холодной прокатки для лабораторных условий, проведены комплексные экспериментальные исследования процесса прокатки листовых деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов в лабораторных и промышленных условиях, изучены их структура и свойства.

Материалом для прокатки служили заготовки прямоугольной формы из исследуемых сплавов размерами 28×150×300 мм, которые перед деформацией подвергались гомогенизационному отжигу по двухступенчатому режиму.

Для проектирования маршрутов обработки была принята схема деформации, включающая горячую прокатку (ГП) заготовки толщиной 28 мм, нагретой до температуры 450 °С, до толщины 10 и 5 мм, а затем холодную прокатку (ХП) полос до толщины 3 и 1 мм. Полосы после холодной прокатки подвергали отжигу по стандартному режиму при температуре 350 °С в течение 3 часов. Разработанный маршрут горячей прокатки полос до толщины 5 мм включал 25 проходов. В качестве оборудования для горячей прокатки использовался стан ДУО 330, а для холодной прокатки – двухвалковый стан MDM ARIETE LS 400×240 с диаметром валков 240 мм.

Максимальная степень суммарной деформации при горячей обработке литых заготовок достигала 82 % при прокатке до толщины 5 мм. Средняя вытяжка за проход составила 1,04. Допустимая сила прокатки равнялась 1,55 МН, а момент прокатки – 0,82 МН·м.

Максимальная степень суммарной деформации при холодной прокатке полос с толщины 10 мм до 3 мм достигала 70 %. Средняя вытяжка за проход составила 1,05. Допустимая сила прокатки равнялась 1,12 МН, а момент прокатки – 0,008 МН·м.

На рис. 2 представлены графики изменения усилия и момента при горячей и холодной прокатке. В результате расчетов было установлено, что значения усилий и моментов прокатки сплавов не превышают допустимые значения, а коэффициенты вытяжки по проходам изменяются плавно, без резких скачков.

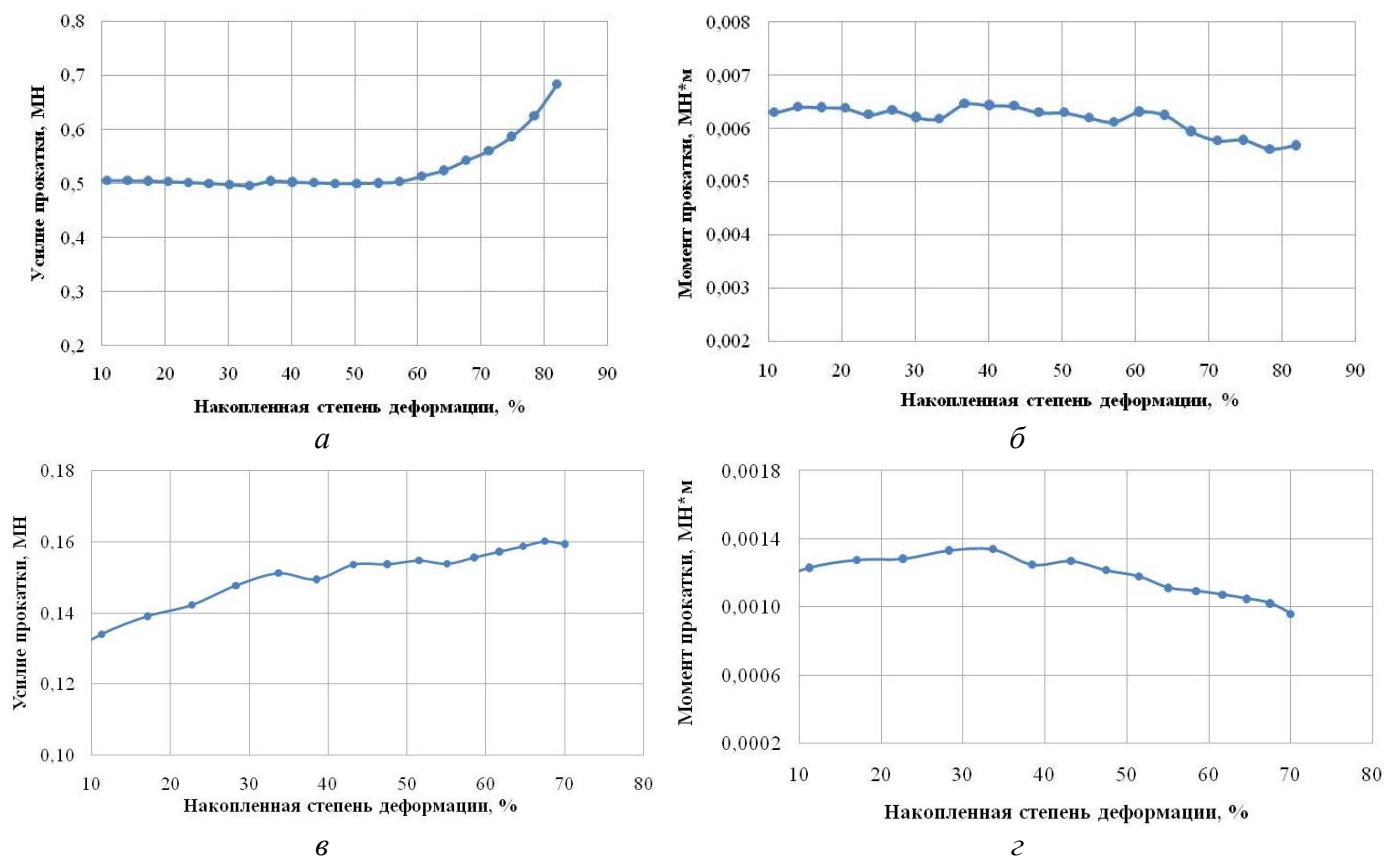


Рисунок 2 – Изменение усилия (а, в) и момента (б, г) прокатки для рассчитанного маршрута от степени деформации: а, б – горячая прокатка; в, г – холодная прокатка

Из полученных полос изготавливали образцы для определения механических свойств металла и микроструктурного анализа, который проводили на световом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m с использованием программного пакета AxioVision.

Металлографические исследования полос после горячей прокатки (рис. 3) выявили достаточно крупные частицы интерметаллидов размером 12-45 мкм при толщине 10 мм и размером 7-38 мкм при толщине 5 мм.

Микроструктура металла полос, полученных холодной прокаткой, подобна структуре горячекатаных полуфабрикатов и включает кристаллы серого цвета в форме многогранников, кристаллы темного цвета в виде протяженных раздробленных пластин, расположенных вдоль направления деформации, и кристаллы неправильной формы темного цвета.

Исследование зеренной структуры показало, что деформированные и отожженные полуфабрикаты имеют преимущественно волокнистое строение. После термической обработки полосы толщиной 3 мм, полученной из горячедеформированного полуфабриката толщиной 10 мм, в структуре металла

наблюдается частичная рекристаллизация α -твердого раствора на фоне волокнистого строения, что связано с повышением степени деформации. В полосах, полученных из горячекатаного полуфабриката толщиной 5 мм, признаков рекристаллизации не обнаружено.

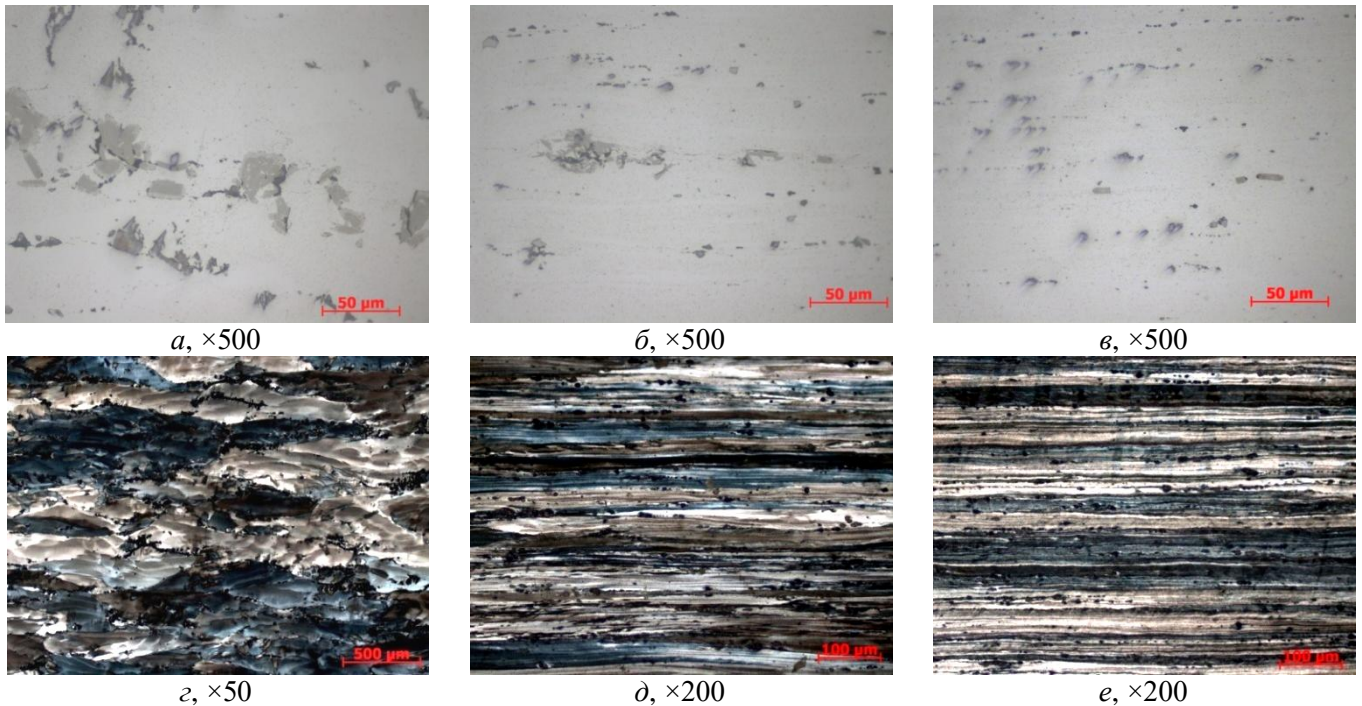


Рисунок 3 – Микроструктура листовых полуфабрикатов из опытного сплава 1, полученных в лабораторных условиях: *a, z* – горячая прокатка до толщины 10 мм; *б, д* – горячая прокатка до толщины 5 мм; *в, е* – холодная прокатка до толщины 3 мм и отжиг

Аналогичные исследования были проведены для полос из сплава 2. Установлено, что нерекристаллизованная структура, независимо от степени деформации, наблюдается в полосах из этого сплава с более высоким содержанием скандия. Температурный и временной режим отжига образцов не обеспечивает протекания рекристаллизационных процессов и в структуре сохраняется волокнистое строение.

Механические свойства (временное сопротивление разрыву σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ) определяли методом статических испытаний на растяжение образцов при комнатной температуре на универсальной испытательной машине LFM 400 kN в соответствии с ГОСТ 1497-84. Анализ механических свойств полуфабрикатов, полученных из экспериментального сплава 1, показывает, что уровень прочностных и пластических свойств достаточно высок и сопоставим со свойствами проката из сплава 2 (табл. 2).

Применение отжига полуфабрикатов из опытного сплава после холодной прокатки при температуре 350 °С и времени выдержки 3 часа дает возможность получить высокие пластические свойства металла (значения относительного удлинения достигают 14%) при достаточно высоких значениях предела текучести

277-282 МПа. Такой уровень механических свойств позволяет изготавливать деформированные полуфабрикаты в виде листового проката из слитков экспериментального сплава 1 с достаточно низким содержанием скандия.

Таблица 2 – Механические свойства образцов сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, в литом, горяче-, холоднокатаном и отожженном состояниях

Состояние	Толщина, мм	Сплав 1			Сплав 2		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Литое	28	312	183	9,8	301	181	7,6
Горячедеформированное	10	369	266	16	326	204	7,1
	8	372	280	13	354	271	6,9
	5	389	312	12	376	297	6,7
Холоднодеформированное	3	453	429	5	470	429	5
	1	554	467	4	535	478	3
Отожженное	3	390	277	14	383	312	14
	1	460	282	14	445	276	13

Сравнивая данные по механическим свойствам металла из исследуемых сплавов, можно утверждать, что уровень прочностных и пластических свойств листовых полуфабрикатов из экономно легированного сплава 1 (0,12 % скандия) не уступает уровню свойств для тех же полуфабрикатов из сплава 2 с большим содержанием дорогостоящего скандия (0,25 %).

Основываясь на результатах лабораторных исследований отработку технологии получения листовых полуфабрикатов в промышленных условиях проводили только для сплава 1.

Для уточнения оптимальной температуры нагрева литых заготовок для дальнейшей прокатки, а также для проектирования схем обжатий и расчета режимов горячей прокатки проводилась оценка технологической пластичности сплава 1 в диапазоне температур 300-500 °С.

При разработке режимов опытной технологии в промышленных условиях были учтены результаты компьютерного моделирования процесса горячей прокатки и принят во внимание производственный опыт горячей прокатки для сплавов системы Al-Mg.

Сравнение результатов горячей прокатки в промышленных условиях и моделирования показало, что при заданных температурно-скоростных условиях характер формоизменения металла, форма проката и появление микротрещин на его кромках соответствуют реальным условиям прокатки. Погрешность при определении энергосиловых параметров не превышает в среднем 5–7%, что подтверждает адекватность разработанной модели. При этом следует отметить, что значения усилий прокатки не превышают допустимых, как при математическом, так и физическом моделировании процесса горячей прокатки. Таким образом, разработанную модель можно применять для анализа формоизменения и энергосиловых характеристик для других типоразмеров слитков.

Микроструктура листовых полуфабрикатов из сплава 1 после горячей и холодной прокатки в промышленных условиях содержит те же структурные составляющие, что и микроструктура полуфабрикатов после лабораторной прокатки и имеет волокнистое строение (рис. 4).

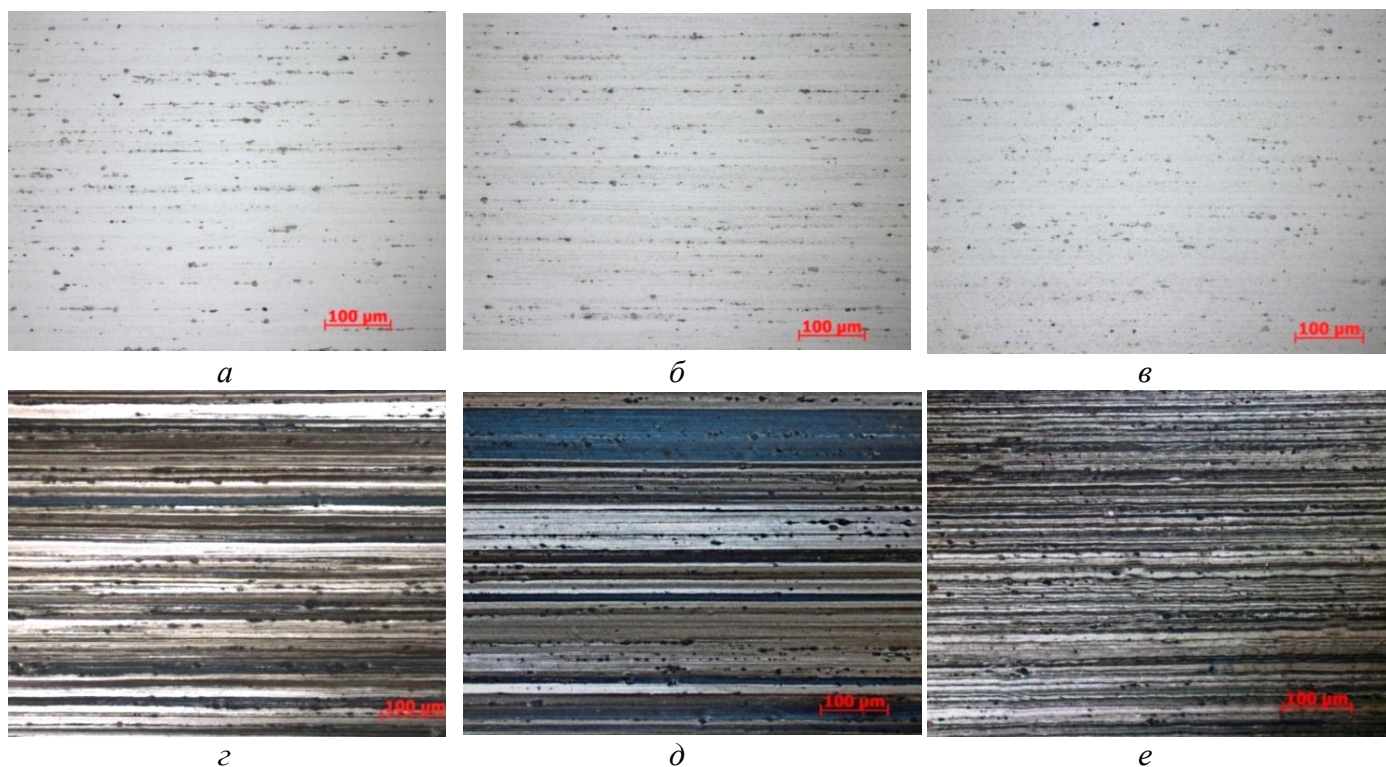


Рисунок 4 – Микроструктура листовых полуфабрикатов из сплава 1, полученных в промышленных условиях, $\times 200$: *a, z* – горячая прокатка до толщины 10,5 мм; *б, д* – горячая прокатка до толщины 8 мм; *в, е* – холодная прокатка до толщины 1,5 мм

В ходе лабораторных исследований было установлено, что отжиг в интервале температур 300-350 °С позволяет достичь оптимального сочетания прочностных и пластических свойств. Сравнительный анализ механических свойств листовых полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях, показал, что они имеют несколько повышенные значения прочностных и пластических свойств, чем полуфабрикаты, изготовленные в лабораторных условиях (табл. 3).

Таблица 3 – Механические свойства образцов сплава 1 после прокатки и отжига

Состояние	Толщина, мм	лабораторные условия			промышленные условия		
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Горячедеформированное	10	369	266	16	388	270	17
	8	372	280	13	391	296	13
	5	389	312	12	392	300	15
Холоднодеформированное	3	453	409	5	458	386	6
	1	459	417	4	432	411	8
Отожженное	3	390	277	14	397	305	15
	1	460	282	14	389	279	20

Практическим результатом проведенных исследований является разработанная технология прокатки крупногабаритных слитков из сплавов системы Al-Mg, экономно легированных скандием, и технические условия на листовую прокат из них.

На основании результатов моделирования и экспериментальных исследований для получения плоских деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg, экономно легированных скандием, методами горячей и холодной прокатки рекомендован следующий режим обработки:

- отжиг-гомогенизация слитков при температуре 455- 465 °С и выдержке 15-44 часов;
- фрезерование прокатываемых граней на толщину 10-20 мм;
- температура нагрева слитков под прокатку 410-420 °С;
- горячая прокатка на реверсивном стане с эджерной клетью до толщины 60-80 мм, степень обжатия при прокатке не более 20% за проход, конечная толщина горячего раската 8 -10 мм;
- удаление кромок с трещинами;
- холодная прокатка со средней степенью обжатия 5-10 %;
- промежуточный отжиг при температуре 300-350 °С в течение 1-3 часов.

В четвертой главе приведены технологические решения по получению сварочной проволоки из исследуемых сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, и сварных образцов из плоского проката, полученного на первом этапе исследований, а также результаты испытаний их механических и коррозионных свойств.

Так как полуфабрикаты из исследуемых сплавов предназначены для использования в судостроении для обшивки корпусов в виде сварных конструкций, необходимо иметь представление о качестве сварного шва и коррозионной стойкости. Соединение плоских образцов проводили методом аргонодуговой сварки (рис. 5), после чего отбирали образцы для оценки качества сварного шва при помощи радиографического контроля.

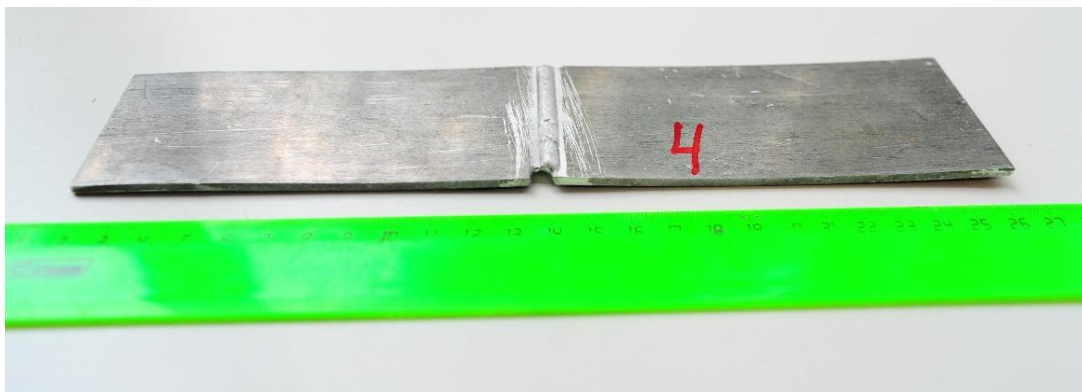


Рисунок 5 – Сварная заготовка со стороны сварного шва

Структуру сварных образцов исследовали в зонах основного металла, сплавления и околошовной зоны, а также зоне термического влияния (рис. 6).

Микроструктура основного металла и зоны термического влияния характеризуется, по сравнению с металлом сварного шва, более крупными частицами избыточных фаз, расположенными преимущественно по границам зерен. Быстрая кристаллизация сварного шва обеспечивает формирование дисперсной структуры и малые размеры избыточных фаз. В исследуемых сплавах в зонах перехода от основного металла и в зоне шва наблюдаются дефекты в виде микропор. Округлая форма пор предполагает их газо-усадочное происхождение. Микроструктура сварного шва представлена зонами ликвационной неоднородности в распределении фаз по движению шва при кристаллизации, выявляются области, как обедненные, так и обогащенные по количеству фаз.

Структуру зон сварного соединения листов исследовали на образцах после нанесения анизотропной оксидной пленки в режиме поляризованного света. Сварное соединение образцов (см. рис. 6) содержит зоны, которые отличаются формой и размером зерна. В околошовной зоне сварных соединений исследуемых сплавов в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, содержится область крупных столбчатых кристаллов, растущих от поверхности сплавления к центру шва. Во всех сварных образцах отсутствует осевая зона столбчатых кристаллов.



Рисунок 6 – Характерные зоны сварных соединений на микроструктуре образцов, $\times 50$

Для сравнительного анализа механических свойств металла из исследуемых сплавов образцы вырезали из проката толщиной 3 мм в трех направлениях (табл. 4).

Результаты сравнения механических свойств исходных образцов после прокатки и образцов после сварки и отжига показали, что прочность сварного шва располагается в интервале 0,75 – 0,85 от прочности основного металла.

Для оценки характера и степени коррозионного разрушения исследуемых сплавов были проведены ускоренные испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) в соответствии с ГОСТ 9.021-74 (раствор №1) и ASTM G 67.

В микроструктуре образцов из сплава 2 в основном выявлены участки питтинговой коррозии глубиной 7–30 мкм во всех рассматриваемых зонах и единственный участок МКК в зоне термического влияния протяженностью 11 мкм и глубиной 8 мкм. Сплав 1 показал хорошую сопротивляемость межкристаллитной коррозии, в микроструктуре не обнаружены участки МКК и зафиксирован лишь единственный участок питтинговой коррозии глубиной 3 мкм в зоне сварного шва.

Таблица 4 – Результаты испытаний механических свойств металла прокатанных и сварных образцов

Сплав	Ориентация образцов к направлению прокатки	Механические свойства образцов					
		после прокатки			после сварки и отжига		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	продольное	450	356	9	381	255	6
	поперечное	440	360	13	359	293	6
	под углом 45°	424	344	15	-	-	-
2	продольное	445	350	7	380	252	6
	поперечное	432	350	7	357	254	5
	под углом 45°	422	329	10	-	-	-

Разрушение при растяжении плоских образцов после испытаний на МКК исследуемых сплавов проходило в основном по границе сварного шва путем среза. Макроизломы исследуемых образцов матового цвета, имеют волокнистый характер и неровные края разрыва. Вблизи места разрушения наблюдается сосредоточенная пластическая деформация в виде незначительной «шейки».

Таким образом, проведенные исследования позволяют рекомендовать режимы термообработки сварных соединений в интервале температур 300-350 °С, выдержка 1-3 часа, которые характеризуются оптимальным сочетанием механических свойств и отсутствием межкристаллитной коррозии. Выбор конкретного режима должен быть уточнен требованиями потребителя продукции к ее механическим свойствам. Результаты коррозионных испытаний показали, что исследованные режимы термообработки практически не влияют на стойкость сплавов к межкристаллитной коррозии.

Для получения сварных образцов использовали сварочную проволоку из исследуемых сплавов, полученную по новой разработанной технологии с использованием устройства по патенту РФ №139085. Технология включает получение катанки диаметром 9 мм методом бесслитковой прокатки-прессования (БПП), холодную сортовую прокатку и волочение до диаметра 3 мм.

Полуфабрикаты в виде катанки, полученные методом БПП, обладают высокими пластическими свойствами за счет дополнительной знакопеременной деформации. Такой характер деформации позволяет повысить скорость экструдирования, а соответственно увеличить производительность за счет

исключения многочисленных трудоемких операций, сократить производственные площади и повысить энергоэффективность процесса. Полуфабрикаты, полученные таким методом, как нельзя лучше подходят в качестве заготовок для производства проволоки, т.к. имеют мелкозернистую структуру и довольно высокие пластические свойства.

Плавку металла производили в керамическом тигле в электрической печи при температуре 780-790 °С, затем удаляли шлак с поверхности расплава, выдерживали в течение 10 минут и заливали в калибр валков, вращающихся со скоростью 4 об/мин. При этом происходила кристаллизация металла, обжатие при прокатке и выдавливание через отверстие матрицы, поджатой к валкам с помощью гидроцилиндра, с калибрующим отверстием диаметром 9 мм. Валки и матрицу предварительно подогревали до 100 °С. Для экспериментальных исследований использовали установку совмещенной обработки СПП-200, технические параметры которой приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Техническая характеристика установки СПП-200

Характеристика	Значение
Начальный диаметр валков, мм	200
Диаметр валка с выступом, мм	214
Диаметр валка с канавкой, мм	164
Длина бочки валка, мм	240
Диаметр шейки вала, мм	100
Размеры калибра в наименьшем сечении, мм	7×15
Количество оборотов валка, об/мин	4-14
Передаточное число редуктора, ед.	40
Мощность электродвигателя, кВт	20
Момент на выходном валу, кН×м	10
Максимальное усилие прижима, кН	300

Полученные полуфабрикаты диаметром 9 мм далее подвергали холодной сортовой прокатке для получения прутков квадратного сечения по режиму, рассчитанному в программном пакете "Provol", созданном на кафедре обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Расчет проводился для сортового двухклетьевого прокатного стана модели AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200. В результате было установлено, что при заданном маршруте холодной сортовой прокатки потребуется 7-8 проходов, при этом расчетные значения усилия и момента прокатки сплавов не превышают допустимые. Анализируя изменение единичного коэффициента вытяжки и степени деформации для рассчитанного режима можно отметить, что распределение деформаций по проходам равномерное, что должно было обеспечить протекание процесса без обрыва и брака по трещинам. Однако в ходе практической реализации сортовой прокатки (рис. 7) по рассчитанному режиму пришлось применять операции промежуточного отжига, так как на поверхности прутка были

отмечены трещины, которые приводили к разрушению полуфабриката. Такое поведение исследуемых сплавов связано с быстрым упрочнением в процессе деформации. Во избежание такого вида брака предложено проводить термическую обработку полуфабрикатов после 2, 4 и 6 проходов для повышения пластических свойств.



Рисунок 7 – Внешний вид прутков после сортовой прокатки

После этого полученный пруток со стороной 5 мм подвергли отжигу и последующему волочению на цепном волочильном стане однократного действия. В результате были получены опытные партии проволоки диаметром 3 мм из исследуемых сплавов.

Изучение микроструктуры прутков диаметром 9 мм, полученных методом БПП из сплавов 1 и 2 показало, что она состоит из α -твердого раствора и включений интерметаллидных фаз, которые расположены в основном по границам зерен (рис. 8).

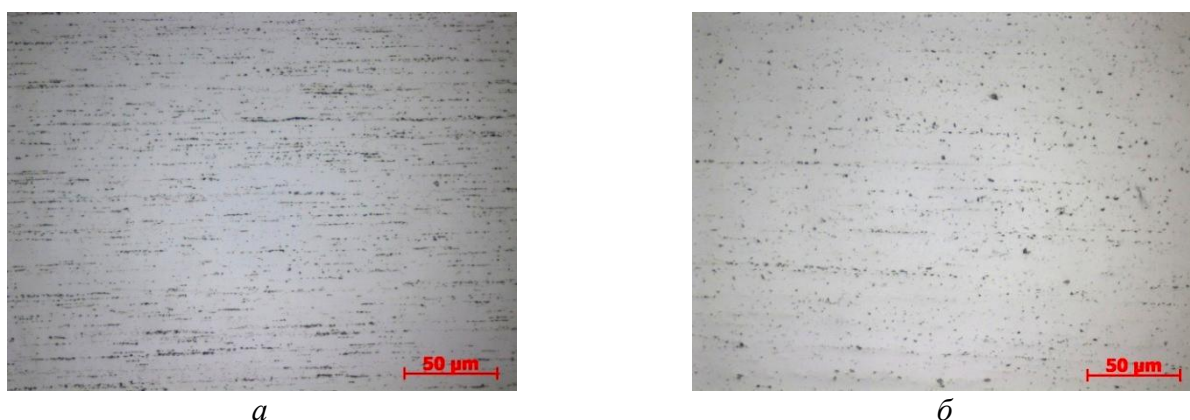


Рисунок 8 – Микроструктура прутков диаметром 9 мм, полученных методом БПП, $\times 500$:
a – сплав 1; *б* – сплав 2

Включения интерметаллидов округлой формы располагаются группами и вытянуты вдоль направления деформации. Интерметаллиды, расположенные по границам зерен прутка из сплава 1, более дисперсные. В микроструктуре сплавов выявлены достаточно крупные частицы в форме пластин и кристаллов, имеющих округлую форму или форму многогранников, размером до 20 мкм. Микрорентгеноспектральным анализом в микроструктуре прутков обнаружены частицы $Al_3(Sc, Zr)$ округлой формы. В исследуемых полуфабрикатах обнаружены кристаллы пластинчатой и полиэдрической формы, в которых присутствуют элементы: Al, Mg, Mn, Cr, Fe. Анализ микроструктуры прутков после сортовой прокатки и проволоки показал, что расположение и форма фаз аналогичны структуре катанки. С увеличением степени деформации происходит измельчение интерметаллидных частиц, а проведение промежуточных отжигов обеспечивает протекание процессов распада пересыщенного твердого раствора с выделением вторичных частиц интерметаллидов.

Механические свойства полуфабрикатов диаметром 9 мм из исследуемых сплавов приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Механические свойства полуфабрикатов диаметром 9 мм, полученных методом БПП

Сплав	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	320	221	25
2	316	217	18

Анализируя полученные данные можно сказать, что комплекс механических свойств полуфабрикатов диаметром 9 мм из опытного сплава 1 выше, чем для тех же полуфабрикатов из известного сплава 2.

Для оценки уровня механических свойств в ходе сортовой прокатки отбирали образцы после прохождения последнего калибра со стороной 5,0 мм, после волочения отбирали образцы от проволоки диаметром 3,0 мм (табл. 7). Температура отжига составляла 400 °С, а время выдержки 3 часа.

Таблица 7 – Механические свойства полуфабрикатов из исследуемых сплавов

Размер, мм	Состояние	Сплав 1			Сплав 2		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
5x5	после сортовой прокатки	502	476	5	421	401	6
	после отжига	410	285	14	389	302	10
диаметр 3,0	после волочения	473	88	2	458	80	2
	после отжига	371	261	19	340	241	18

Проволока, полученная по предлагаемой технологии, имеет хороший внешний вид, на поверхности не наблюдается трещин и задиров. После отжига она характеризуется высокими показателями прочности при достаточно хорошем уровне пластичности. Эксплуатационные свойства проволоки были проверены на

Красноярском машиностроительном заводе, где было установлено, что она может применяться для сварки листовых полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg.

Влияние отжига на структуру и свойства проволоки оценивали для полуфабрикатов из сплава 1. Исследования проводили при температурах 350, 450 и 500 °С при выдержках 3 и 6 часов (рис. 9).

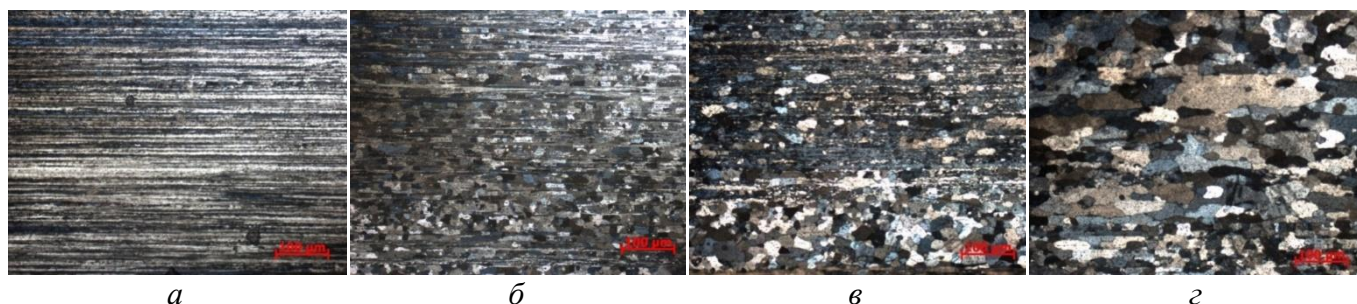


Рисунок 9 – Микроструктура проволоки из сплава 1 в деформированном и отожженном состоянии, $\times 200$: *а* – деформированное состояние; *б* – после отжига 350 °С, 6 часов; *в* – после отжига 450 °С, 6 часов; *г* – после отжига 500 °С, 6 часов

В проволоке рекристаллизация по всему сечению реализуется при температуре 500 °С и выдержке 6 часов. Таким образом, присутствие Zr и Sc в сплаве 1 и образование этими элементами когерентных дисперсоидов препятствует процессу рекристаллизации проволоки при отжиге не выше 450 °С и выдержке до 6 часов.

Технология получения прутков методом совмещенной обработки прошла опытно-промышленную апробацию на Красноярском заводе современных материалов. Сварочная проволока из исследуемых сплавов прошла испытания в лаборатории сварки Красноярского машиностроительного завода, по результатам которых установлено, что потеря прочности сварного шва составляет менее 10% от номинального требования для сплава АМг6 в отожженном состоянии, что соответствует ОСТ 92-1114-80 для сварных швов первой категории.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных диссертационных исследований в настоящей работе решена актуальная научно-техническая проблема, направленная на повышение эффективности технологий производства деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, за счет создания комплекса технических и технологических решений.

На основании выполненных исследований сделаны выводы и получены следующие результаты.

1. Разработан новый алюминиевый сплав на основе системы Al-Mg, экономно легированный скандием до 0,12 масс.%. Полуфабрикаты из данного сплава обладают высокой коррозионной стойкостью и уровнем свойств, отвечающим требованиям заказчика.

2. С использованием реологических характеристик исследуемых сплавов созданы компьютерные модели процесса горячей листовой прокатки, установлены рациональные режимы прокатки и определены энергосиловые, деформационные и температурно-скоростные параметры.

3. Проведены экспериментальные исследования по получению опытных партий листовых полуфабрикатов из исследуемых сплавов методами горячей и холодной прокатки в лабораторных и промышленных условиях и изучены их структура и свойства.

Для получения плоских деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов методами горячей и холодной прокатки рекомендован следующий режим обработки:

- отжиг-гомогенизация слитков при температуре 455- 465 °С и выдержке 15-44 ч.;
- фрезерование прокатываемых граней на толщину 10-20 мм;
- температура нагрева слитков под прокатку 410-420 °С;
- горячая прокатка на реверсивном стане с эджерной клетью до толщины 60-80 мм, степень обжатия при прокатке не более 20% за проход, конечная толщина горячего раската 8 -10 мм;
- удаление кромок с трещинами;
- холодная прокатка со средней степенью обжатия 5-10 %;
- промежуточный отжиг при температуре 300-350 °С в течение 1-3 часов.

Рекомендуемые режимы прокатки позволяют получать полуфабрикаты с необходимым уровнем свойств.

4. Предложена технология получения сварочной проволоки из сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, с использованием операций бесслитковой прокатки-прессования, холодной сортовой прокатки и волочения. Для изготовления прутков диаметром 9 мм на установке СПП-200 разработан и опробован следующий режим обработки: температура расплава 780 °С; температура нагрева инструмента 100 °С; скорость вращения валков 4 об/мин.

5. Разработаны новые технические решения по конструкциям оборудования для совмещенной обработки, защищенные патентами РФ №156613 и №139085, которые позволяют расширить технологические возможности процесса и срок эксплуатации прессового инструмента.

6. С применением полученной сварочной проволоки из исследуемых сплавов методом аргонодуговой сварки изготовлены сварные образцы из полученного ранее плоского проката, прочность сварного шва которых находится в интервале 0,75-0,85 от прочности основного металла. Коррозионные испытания показали, что термическая обработка не оказывает влияния на устойчивость полуфабрикатов к межкристаллитному виду коррозии.

7. Предложенная технология прокатки листовых полуфабрикатов из сплава 1 прошла промышленную апробацию на одном из металлургических предприятий России. В результате получены опытные партии рулонов, плит и листов и разработаны технические условия (ТУ 1-3-231-2017) на листовой прокат.

8. Технология получения прутков диаметром 9 мм методом БПП на установке СПП-200 прошла промышленную апробацию на Красноярском заводе современных материалов и позволяет получать качественные деформированные полуфабрикаты, свойства которых отвечают требованиям ГОСТ 7871-75.

9. Опытные партии проволоки диаметром 3 мм из исследуемых сплавов прошли промышленные испытания в лаборатории сварки Красноярского машиностроительного завода, по результатам которых потеря прочности сварного шва составляет менее 10% от номинального требования для сплава АМг6 в отожженном состоянии, что соответствует ОСТ 92-1114-80 для сварных швов первой категории.

10. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются при обучении бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» и аспирантов научной специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Якивчук, О.В.** Исследование механических свойств полуфабрикатов из алюминиево-скандиевого сплава // В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников, Ю.А. Зенкин, А.И. Безруких [и др.] // «Известия Тульского государственного университета. Технические науки». - 2017. - Вып.11: в 3 ч. - Ч. 1. – С. 147-153 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

2. **Yakivchuk, O.** Physical Modeling Technological Regimes of Production Deformed Semi-Finished Products from Experimental Aluminium Alloys Alloyed by Scandium / V. Baranov, S. Sidelnikov, E. Zenkin// «Materials Science Forum Resource Efficient Material and Forming Technologies». – 2018. – pp. 54-62 (**издание, входящее в базу цитирования Scopus**).

3. **Yakivchuk, O.** Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding / V. Baranov, S. Sidelnikov, E. Zenkin, V. Frolov, D. Voroshilov [and ect.] // «Open Engineering». – 2018. – V.8 – pp. 69-76 (**издание, входящее в базу цитирования Scopus**).

4. **Якивчук, О.В.** Разработка режимов горячей и холодной прокатки и исследование механических свойств полуфабрикатов из опытных сплавов системы Al–Sc / В.А. Фролов, О.В. Якивчук, Ю.Д. Дитковская // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Проспект Свободный». – Красноярск: СФУ, 2016. – С. 58-61.

5. **Якивчук, О.В.** Основные способы повышения уровня механических свойств алюминиевых сплавов системы Al–Mg / О.В. Якивчук, А.П. Самчук // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Проспект Свободный». – Красноярск: СФУ, 2016. – С. 68-69.

6. **Якив்யюк, О.В.** Исследование технологичности обработки и свойств проката из алюминиевых сплавов системы Al-Mg, экономно легированных скандием / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, В.Ф. Фролов, А.Ю. Крохин [и др.] // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докладов VIII международного конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, – 2016. – С. 262-263.

7. **Якивьяук, О.В.** Исследование механических свойств длинномерных полуфабрикатов из сплавов на основе системы Al-Mg, экономно легированных скандием / О.В. Якивьяук, А.П. Самчук, А.В. Дурнопьянов // Уральская молодых металлургов: сб. материалов XVIII международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 460-464.

8. **Якивьяук, О.В.** Исследование прочностных свойств полуфабрикатов из экономнолегированных высокопрочных алюминий-скандиевых сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве / В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников, Ю.А. Зенкин, В.Ф. Фролов [и др.] // Цветные металлы и минералы – 2017: сб. тезисов докладов IX международного конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, – 2017. – С. 717-718.

9. **Якивьяук, О.В.** Исследование механических свойств холоднокатаных, отожженных и сварных полуфабрикатов из опытных сплавов системы Al-Mg, экономнолегированных скандием // В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников, В.Ф. Фролов, Е.Ю. Зенкин [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч.2 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т.- Новокузнецк: Изд. цент СибГИУ, 2017.- С. 149-153.

10. **Якивьяук, О.В.** Разработка инновационной технологии горячей и холодной прокатки листовых полуфабрикатов из нового алюминиевого сплава, экономно легированного скандием / О.В. Якивьяук, И.Н. Довженко, И.Н. Белоконова // MagnitigorskRollingPractice: материалы III молодежной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, – 2018. – С. 45-47.

11. Пат. №139085 Российская Федерация, МПК В21С 23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов, Н.Н. Довженко, **О.В. Федорова (О.В. Якивьяук)** [и др.]; патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2013152037/02; заявл. 21.11.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.

12. Пат. №156613 Российская Федерация, МПК В21С 23/00. Устройство для непрерывной прокатки-прессования полых пресс-изделий из цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, А.П. Самчук, В.М. Беспалов, **О.В. Федорова (О.В. Якивьяук)** [и др.]; патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2015114727/02; заявл. 20.04.2015; опубл. 10.11.2015 Бюл. №31.

Подписано в печать ____ . ____ .2018. Печать плоская. Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Тир 100 экз. Заказ _____

Отпечатано полиграфическим центром

Библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49

E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>