

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Новых материалов и технологий

Департамент Инженерная школа новой индустрии

22.04.02 Metallurgy

Профиль 08.01– Обработка металлов давлением на предприятиях металлургической и машиностроительной отраслей промышленности

УДК 621.7.092

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Зав. кафедрой ОМД д.т.н.
_____ Щварц Д.Л.

«____» _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ПРАВКИ
РАСТЯЖЕНИЕМ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Пояснительная записка

Руководитель д.т.н.

Ю.Н. Логинов

Нормоконтролер к.т.н.

Нухов Д.Ш.

Студент гр. НМТЗМ-382312

Д.О. Соболев

Екатеринбург 2020

РЕФЕРАТ

В данной работе приведены основные свойства и виды плоских полуфабрикатов из алюминия и алюминиевых сплавов. Рассмотрена технология производства плоских полуфабрикатов, технология и оборудование для проведения правки растяжением. Приведены новые патентные разработки в области прокатки плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов.

Представлены результаты исследования неравномерности деформации в процессе правки растяжением листового проката из алюминиевых сплавов. Представлено решение задачи правки растяжением полос из алюминиевых сплавов методом конечных элементов в системе ABAQUS с целью определения уровня деформаций. Приведен анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов.

С. 83, рис. 16, табл. 9, библи. наим. 46.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И ИХ СВОЙСТВА	7
1.1 Основные свойства алюминия и алюминиевых сплавов	7
1.2 Маркировка полуфабрикатов из алюминиевых сплавов	9
1.3 Виды плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов	15
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	16
2.1 Характеристика технологических операций изготовления плоского алюминиевого проката	16
2.2 Технология правки растяжением	25
2.3 Оборудование для правки растяжением Ошибка! Закладка не определена.	
3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	42
3.1 Новые патентные разработки в области прокатки плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов	42
3.2 Решение задачи правки растяжением полос из алюминиевых сплавов методом конечных элементов	59
3.2.1 Описание постановки задачи	59
3.2.2 Решение задачи	62
3.2.3 Выводы из решения задачи	65
3.3 Анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов	66
3.3.1 Введение и описание методики измерений	66
3.3.2 Описание используемых параметров	69
3.3.3 Результаты измерений и их анализ	72
3.3.4 Выводы из анализа распределения деформаций	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	79
Приложение. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	84

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, широко применяемых в авиакосмической технике, наземном и водном транспорте, строительстве и других отраслях народного хозяйства и бытовой техники.

Высокие требования к качеству и свойствам листовых полуфабрикатов определяют сложность и многооперационность технологического процесса их изготовления.

Разработка и внедрение новейших методов и технологий изготовления продукции позволяет получить требуемые механические свойства, эксплуатационные характеристики и высокое качество продукции в совокупности со снижением отбраковки и экономией энергетических ресурсов.

Различные виды термомеханической обработки (ТМО), позволяющие значительно улучшить свойства сплавов, получили в настоящее время широкое распространение в технологии изготовления изделий из алюминиевых сплавов. Основная идея ТМО – сочетание пластической деформации и термической обработки, при котором пластическая деформация положительно влияет на эффект термообработки.

Расчеты напряженно-деформированного состояния при обработке металлов давлением (ОМД) представляют собой трудную вычислительную задачу. Принято считать правку листовых полуфабрикатов методом растяжения наиболее простым процессом обработки металлов давлением. Это обусловлено тем, что обычный подход к ее описанию заключается в принятии гипотез об однородности свойств металла и наличии схемы одноосного напряженного состояния. В этом случае на заготовку действует единственное напряжение растяжения, что упрощает описание процесса. Однако ситуацию усложняют сопутствующие реальному производству факторы.

1. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И ИХ СВОЙСТВА

1.1 Основные свойства алюминия и алюминиевых сплавов

Для получения алюминиевых сплавов с различными свойствами алюминий легируют другими металлами. Современные алюминиевые сплавы подразделяют на две большие категории: сплавы, обрабатываемые давлением (деформируемые), и литейные. Деформируемые сплавы используют для получения полуфабрикатов и изделий методами обработки металлов давлением (прокаткой, прессованием, ковкой штамповкой и т.д.). Деформируемые сплавы разделяют на термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Термическое упрочнение достигается закалкой с последующим естественным или искусственным старением. Так же применяемые сплавы можно разделить по системам, в которых основные легирующие компоненты определяют типичные для данной системы физические и химические свойства. По существу общность свойств сплавов определенной системы определяется фазовым составом.

При производстве полуфабрикатов из алюминия широко используют различные способы горячей и холодной обработки давлением. Пластическая деформация металла при обработке давлением является не только средством получения изделий определенной формы, она так же кардинально изменяет структуру алюминия и алюминиевых сплавов и тем самым эффективно влияет на их свойства. Некоторые изменения структуры металла после пластической деформации видны уже невооруженным глазом при изучении макроструктуры, другие можно обнаружить лишь при исследовании тонкой структуры в электронном микроскопе или методами рентгеноструктурного анализа.

Алюминиевые сплавы отличаются высокой удельной прочностью, простотой изготовления из них полуфабрикатов, высокой стойкостью против коррозии, повышенными пластическими характеристиками при низких температурах. Конструкции из алюминиевых сплавов обладают высокой

сейсмостойкостью, огнестойкостью и имеют хороший внешний вид. Такое сочетание преимуществ алюминиевых сплавов позволяет создавать из них конструкции различной формы и назначения.

Высокая удельная прочность – основное преимущество алюминиевых сплавов. Сравнение удельной прочности алюминиевых сплавов и других современных конструкционных материалов показывает, что конструкции из алюминиевых сплавов значительно превосходят конструкции из других сплавов, включая высокопрочную сталь.

Следует отметить, что прочностные характеристики алюминиевых сплавов зависят от ряда факторов: типа, марки и состояния сплава; вида, формы и размеров полуфабрикатов (например, наличие и толщина плакирующего слоя) и других. Широкий диапазон свойств алюминиевых сплавов позволяет выбирать необходимые марки сплавов в зависимости от назначения и условий работы конструкции.

Основные недостатки алюминиевых сплавов – сравнительно низкий модуль упругости, высокий коэффициент линейного расширения и относительная сложность выполнения соединений.

1.2 Маркировка полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

Применяемые алюминиевые сплавы можно разделить по системам, в которых основные легирующие компоненты определяют типичные для данной системы физические и химические свойства.

Для обозначения алюминиевых деформируемых сплавов и полуфабрикатов в России используется буквенно-цифровая и цифровая маркировки.

Так, сплавы алюминия с марганцем маркируются буквами АМц, следующие за буквами цифры обозначают приблизительное содержание в % марганца в сплаве. Сплавы алюминия с магнием маркируются буквами АМг, следующие за буквами цифры приблизительно обозначают содержание в % магния в сплаве. Сплавы алюминия, так называемые дуралюмины, маркируются буквой Д, а последующие цифры обозначают; 1 — сплавы легированные медью и магнием — Д16, где цифра, следующая за единицей, обозначает номер сплава; 2 — сплавы, легированные медью и марганцем — Д20 или медью, магнием и марганцем — Д21; сплавы алюминия с магнием, кремнием и медью маркируются — АВ (авиаль); АД31. Некоторые ковочные сплавы имели обозначение АК (алюминий ковочный): АК6; АК8; АК4-1. В сплаве В95 — буква В обозначала ВИАМ, а цифра 95 — номер завода, где он впервые был освоен.

Порошковые сплавы алюминия с окисью алюминия обозначались буквами САП (спеченная алюминиевая пудра), а легированные дополнительно другими легирующими элементами — САС (спеченные алюминиевые сплавы). Вспененный водородом алюминий маркировался как пеноалюминий.

Взамен буквенной и буквенно-цифровой маркировки была разработана цифровая маркировка алюминиевых сплавов, которая состоит из четырех цифр.

Первая цифра в этой маркировке обозначает основу сплава. Алюминий и сплав на его основе маркируют цифрой 1. Вторая цифра обозначает основной легирующий компонент или основные легирующие компоненты. Вторая цифра 0 обозначает различные марки алюминия, спеченные алюминиевые сплавы (САС), различные сорта пеноалюминия. Цифрой 1 обозначают сплавы системы Al-Cu-Mg, цифрой 2 – сплавы системы Al-Cu, цифрой 3 – сплавы системы Al-Mg-Si, цифрой 4 – сплавы системы Al-Li, а также сплавы, легированные малорастворимыми компонентами, например переходными металлами (марганцем, хромом, цирконием); сплавы, замаркированные цифрой 5, базируются на системе Al-Mg и называются магналиями; сплавы систем Al-Zn-Mg или Al-Zn-Mg-Cu обозначаются цифрой 9. Цифры 6, 7 и 8 – резервные. Последние две цифры в цифровом обозначении – порядковый номер сплава. Последняя цифра несет дополнительную информацию: сплавы, оканчивающиеся на нечетную цифру, – деформируемые; на четную, – литейные.

В таблице 1 дано обозначение основных деформируемых алюминиевых сплавов по буквенно-цифровой и цифровой отечественным системам маркировки.

Таблица 1 – Маркировка деформируемых алюминиевых сплавов

Буквенная и буквенно-цифровая маркировка	Цифровая маркировка
Технический алюминий	
АД0	1011
АД1	1013
Сплавы систем Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Fe-Ni	
Д1	1110
Д16	1160
–	1163
Д19	1190
АК4	1140
АК4-1	1141

Продолжение таблицы 1

Буквенная и буквенно–цифровая маркировка	Цифровая маркировка
Сплавы системы Al–Cu–Mn	
Д20	1200
Д21	1210
Сплавы систем Al–Mg–Si, Al–Mg–Si–Cu	
АД33	1330
АВ	1340
АК6	1360
АК8	1380
Сплавы системы Al–Mn	
АМц	1400
АМц1	1401
Сплавы системы Al–Li	
–	1420
–	1421
–	1440
ВАД–23	–
	1460
Сплавы системы Al–Mg	
АМг2	1520
АМг3	1530
АМг5	1550
АМг6	1560
АМг61	1561
Сплавы систем Al–Zn–Mg, Al–Zn–Mg–Cu	
В95	1950
В95пч	–
В95оч	–
В96Ц3	1963

В США на основе стандартов ASTM принята единая цифровая четырехзначная система обозначения деформируемых алюминиевых сплавов. Она является наиболее распространенной и используется в качестве международной. В ее основе система легирования алюминиевых сплавов, база – основной легирующий элемент. Первая цифра обозначения указывает на систему легирования, к которой относится сплав:

- алюминий чистотой 99% и выше – 1;
- система Al–Cu – 2;
- система Al–Mn – 3;
- система Al–Si – 4;
- система Al–Mg – 5;
- система Al–Mg–Si – 6;
- системы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu – 7;
- прочие системы легирования – 8.

Вторая цифра обозначения указывает на порядковый номер модификации относительно исходного сплава (в исходном вторая цифра – 0) или свидетельствует о чистоте сплава по примесям. Две последние цифры обозначают непосредственно сплав.

В Японии и Китае используется та же система обозначения, что и в США. В Германии для маркировки алюминия и алюминиевых сплавов принят европейский стандарт EN 573–3: 2013. Данный стандарт рассматривает шифровые обозначения, соответствующие европейским нормам. Основой этих шифровых обозначения являются в первую очередь химические символы. Эта маркировка предусмотрена главным образом в качестве дополнения к четырехзначной нумерационной системе обозначения.

В зависимости от методов обработки полуфабрикатов в процессе изготовления и требуемых характеристик, в технической документации принято определенное обозначение и маркировка состояния поставки (обработки) полуфабриката, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Обозначения состояния поставки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

Маркировка		Состояние поставки
Россия	США	
Без термообработки	F	После изготовления, без дополнительной термической обработки. Степень нагартовки и механические свойства не контролируются.
ГК	–	Горячекатаное.

Продолжение таблицы 2

Маркировка		Состояние поставки
Россия	США	
М	О	Отожженное (мягкое). Наиболее высокая пластичность и стабильность размеров.
Н	—	Нагартованное (холоднодеформированное).
Н4	Н18	Усиленное нагартованное.
Н3	Н16	На три четверти (3/4) нагартованное, повышение прочности
Н2(П)	Н14	Полунагартованное (1/2), повышение прочности
Н1	Н12	На четверть (1/4) нагартованное, повышение прочности
З	W	Закаленное (нестабильное, обычно указывается длительность естественного старения после закалки), повышение прочности
Т	Т3, Т4	Закаленное и естественно состаренное. Получение достаточно высокой прочности, повышенной пластичности, трещиностойкости и сопротивления усталости
Т1	Т6	Закаленное и искусственно состаренное на максимальную прочность
Т12	Т77	Закаленное и искусственно перестаренное. Улучшение характеристик сопротивления коррозии, трещиностойкости, пластичности при некотором снижении прочности. В русской маркировке возрастание первой цифры при букве указывает на увеличение степени перестаривания и разупрочнения.
Т2	Т76	
Т3	Т73	
ТН	Т31, Т36, Т37, Т39	Закаленное, естественно состаренное и нагартованное. Повышение прочности при снижении характеристик пластичности, трещиностойкости. На степень деформации нагартовки указывает вторая цифра.
Т1Н	Т81, Т83, Т86, Т87	Закаленное, нагартованное и искусственно состаренное. Повышение прочности при снижении характеристик пластичности, трещиностойкости. На степень деформации нагартовки указывает вторая цифра.
Т1Н1	Т9	Закаленное, искусственно состаренное и нагартованное. Повышение прочности, особенно при совмещении с процессом формообразования детали.

В свежезакаленном состоянии длинномерные катаные полуфабрикаты, как правило, подвергаются регламентированной правке растяжением. В этом

случае в зарубежной маркировке состояния поставки дополнительно указывается «51», например «Т7351».

1.3 Виды плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

Листовой прокат является плоским продуктом, раскатанным в поперечном направлении до прямоугольного сечения. Его принято подразделять на толстый и тонкий.

Тонкий алюминиевый прокат (листы) характеризуется толщиной до 6 мм. Поставляются тонкие изделия в бухтах и в плоском виде. Очень часто листовой прокат проходит дополнительную обработку, которая улучшает его эксплуатационные качества.

Тонкий лист из алюминия широко применяется в строительстве. Его поверхность анодируют, окрашивают жидкими и порошковыми красящими составами, протравливают, ламинируют, полируют. После таких операций лист получает уникальный внешний вид, что дает возможность использовать его для решения разнообразных отделочных работ.

Также тонкий листовой прокат применяется для изготовления обшивки авиатехники, автомобилей и лодок, панелей автобусов, трейлеров, грузовой автотехники, номерных и дорожных знаков, предметов бытового применения.

Толстый лист из алюминия – это плоский прокат с толщиной более 6 мм. Такие изделия принято называть алюминиевыми плитами. Они также подвергаются разным способам дополнительной обработки. Их можно вытягивать, штамповать, гофрировать, сгибать под различными углами, чтобы получить требуемые по конфигурации детали и крупные конструкции с уникально высоким уровнем прочности.

Производство такого проката ориентировано в основном на промышленные предприятия. Из алюминиевых толстых листов изготавливают конструкции (несущие) космических аппаратов и самолетов, нефтяные прибрежные хранилища, броню для военной техники, автомобильные и железнодорожные цистерны, палубные сооружения на военных и коммерческих кораблях.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Характеристика технологических операций изготовления плоского алюминиевого проката

В зависимости от особенностей оборудования, программы выпуска, свойств сплавов, технических условий на продукцию технологические процессы изготовления плоского проката могут быть различными. Однако основы для каждого процесса являются общими. Типичную схему производства плоского проката из алюминиевых сплавов можно разбить на следующие стадии:

1. Подготовительные операции.
2. Горячая прокатка.
3. Холодная прокатка.
4. Термомеханическая обработка.
5. Отделочные операции.

При проектировании технологического процесса изготовления листов необходимо учитывать установленные требования к качеству готовой продукции.

Гомогенизирующий отжиг слитков необходим для снятия напряжений, возникающих во время литья, и для устранения внутрикристаллической ликвации, появляющейся при затвердевании.

Фрезерование поверхности необходимо для удаления ликвационных наплывов, развивающихся при затвердевании вследствие наличия в составе сплавов легкоплавких фаз и эвтектик.

Плакирование чистым алюминием необходимо вследствие того, что сложный фазовый состав создает в сплавах большое количество гальванических микроэлементов. Под действием агрессивных сред (влаги, морской атмосферы) начинается коррозия, сопровождающаяся быстрым снижением прочности.

В настоящее время слитки из алюминиевых сплавов изготавливаются методом непрерывного и полунепрерывного литья. После отливки слитки подвергаются гомогенизации.

Целью гомогенизации является уменьшение неоднородности слитка по химическому составу и снятие остаточных термических напряжений, возникающих при полунепрерывном литье и резком охлаждении. В результате гомогенизации происходит значительное возрастание пластичности слитка, что делает его более пригодным для горячей прокатки.

Гомогенизация осуществляется путем нагрева слитков до температуры, близкой к линии солидуса (по диаграмме состояния определенного сплава), длительной выдержки при этой температуре и медленного охлаждения.

Гомогенизацию выполняют, чтобы:

- а) улучшить свойства слитков (повысить пластичность для облегчения процесса деформирования);
- б) улучшить качество полуфабрикатов (например, гомогенизация слитков из сплава АМц повышает механические свойства и улучшает структуру отожженных листов);
- в) уменьшить анизотропию механических свойств, возникающую при прокатке;
- г) снять внутренние напряжения;
- д) повысить антикоррозионные свойства листовой продукции.

В целом гомогенизация способствует получению более однородного сплава. Однородность химического состава слитка определяет его поведение при дальнейшей обработке давлением, а также физико-химические свойства готовых полуфабрикатов.

Необходимо строго контролировать температуру при нагреве вследствие высокой чувствительности сплавов к перегреву. Перегрев вызывает оплавление низкоплавких эвтектик, расположенных по границам

зерен, что сопровождается образованием горячих трещин и резким падением механических свойств изделий.

Гомогенизация представляет собой сложный процесс. При нагреве слитка и выдержке его при температуре гомогенизации происходят:

а) процессы растворения, сопровождающиеся диссоциацией химических соединений и отводом атомов металла путем диффузии в глубь твердого раствора;

б) выравнивающие диффузионные процессы, уменьшающие ликвацию элементов.

Основным является температурно-скоростной фактор: скорость нагрева металла до необходимой температуры гомогенизации, температура гомогенизации, продолжительность гомогенизации и скорость охлаждения до окончания процесса.

После гомогенизации слябы обрезают и разрезают с помощью дисковой пилы. Операции обрезки и разрезки на заготовки выполняют в зависимости от принятого технологического процесса. Например, при прокатке слитка в поперечном направлении длина разрезанных слябов зависит от ширины горячекатаной полосы. Для разрезки слябов обычно применяют быстроходные дисковые пилы с подвижной рамой.

Ликваты на поверхности слитков служат помехой и затрудняют получения качественной поверхности полуфабриката после прокатки. В процессе деформации ликваты измельчаются и внедряются в основной металл. Ликвационные наплывы должны быть удалены с поверхности заготовок, для чего заготовки подвергают сплошной двусторонней фрезеровке со снятием с каждой стороны слоя толщиной 3–30 мм в зависимости от химического состава сплава.

Величину максимальной температуры, при которой можно вести прокатку, устанавливают с учетом структурного строения слитка. Присутствующие в прочных сплавах сложные низкоплавкие эвтектики

обуславливают прокатку при более низких температурах. Если превысить допустимые температуры прокатки, то при температуре образования эвтектик в металле создаются хрупкие ослабленные участки и в результате деформации возникают горячие трещины. Для пластичных сплавов, у которых это ограничение отсутствует, допускаются более высокие температуры нагрева.

Нижний предел температуры нагрева обусловлен тем, что пластичность литого слитка падает с понижением температуры прокатки. Низкие температуры особенно недопустимы в первых пропусках, когда сляб имеет недеформированную структуру. При захолаживании сляба в процессе прокатки начинается процесс трещинообразования. На поверхности сляба трещины образуются в виде мелкой сетки, на кромках — в виде глубоких надрывов. Прокатка при низких температурах не допускает применения больших обжатий за пропуск, которые уменьшают склонность слябов к раскрытию и обеспечивают получение мелкозернистой структуры в готовом листе. Снижение температуры в процессе прокатки не приводит к дефектам, так как деформированная структура обуславливает повышение пластичности.

Температурно–скоростные условия горячей прокатки определяют структуру горячекатаной заготовки, то есть размер и ориентацию зерен, что в свою очередь влияет на свойства заготовки после отжига — ее прочность и пластичность. Для стабильного получения этих свойств необходимо стремиться выдерживать температурные диапазоны прокатки.

При горячей прокатке сляб исходной толщиной 200—460 мм превращается в горячекатаную полосу толщиной 2,5–8 мм, являющуюся заготовкой для холодной прокатки, либо в плиту толщиной 12–210 мм в зависимости от номинальной (сдаточной) толщины плиты.

Прокатку ведут с максимальными обжатиями за проход. Помимо высокой производительности, большие обжатия обеспечивают уменьшение

раскрытия слябов и заготовка получается с минимальным размером зерна. Кроме того, благодаря быстрому протеканию процесса и тепловому эффекту деформации прокатка заканчивается при более высоких температурах, что облегчает процесс обжatia в валках и снижает расход энергии.

Величина обжatia при прокатке высокопрочных алюминиевых сплавов определяется двумя факторами: трещинообразованием и усилиями прокатки, ограниченными прочностью прокатной клетки и моментом, развиваемым приводным двигателем стана.

Существенные усовершенствования, внесенные за последние годы в методы литья, настолько улучшили качество слитка, что по металлургическим условиям величина обжatia ограничивается лишь в первых 3—5 проходах, в которых приходится опасаться растрескивания граней. Кроме того, применение очень больших обжатий в начале прокатки ограничивается углом захвата и налипанием металла на валки.

В отношении скорости прокатки следует отметить, что в первых проходах не рекомендуется применять скорость прокатки больше 1,0—1,2 м/сек, особенно при больших обжатиях, так как вследствие интенсивного налипания значительная часть наружной поверхности полосы может покрыться трещинами.

При дальнейшей прокатке величина обжatia лимитируется только углом захвата и величиной усилий, возникающих при прокатке. Поэтому обжatia по пропускам обычно распределяются таким образом, что в начале прокатки они равны 8—10%, а затем по мере дробления литой структуры и возрастания пластичности сляба увеличиваются, достигая в последних проходах 45% и более.

Прокатка широкой заготовки из прочных алюминиевых сплавов с применением высоких обжатий за пропуск сопровождается очень большими давлениями металла на валок, достигающими 9,8 МН и более на 1 м ширины

прокатываемой полосы. Это требует применения особо прочных клеток с большим крутящим моментом приводного двигателя.

При горячей прокатке получают заготовки для дальнейшей холодной прокатки или горячекатаные листы и плиты.

Увеличение производительности реверсивных станов достигается разделением процесса горячей прокатки между двумя клетями, установленными последовательно в одну линию. Помимо того, что растет производительность, разделение клеток позволяет осуществить их специализацию как черновой и чистовой, что должно способствовать улучшению качества выкатки листов. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

- время прокатки должно распределяться между клетями таким образом, чтобы продолжительность прокатки в чистовой клети была на 15—20% меньше, чем в черновой;

- диаметр рабочих валков в черновой клети, в которой даются большие обжатия, надо брать большим, чем в чистовой.

Цель холодной прокатки — получение листов и лент необходимых размеров с высоким качеством поверхности и требуемыми механическими свойствами.

Необходимость холодной прокатки вызывается:

- интенсивным охлаждением тонких лент при горячей прокатке, в результате чего резко возрастают давления и ухудшается выкатка;

- невозможностью получения при горячей прокатке листов и лент с высоким качеством поверхности и выкатки;

- требованиями получения материала с заданными механическими свойствами и структурой, которые невозможно обеспечить при горячей прокатке.

Пользуясь терминологией С. И. Губкина, при холодной деформации рекристаллизация и возврат полностью отсутствуют, а с увеличением

степени деформации повышаются все показатели прочности — предел прочности и предел текучести, предел пропорциональности и предел упругости. Увеличение предела прочности происходит, как правило, особенно интенсивно при степени деформации, равной примерно 25—30%. При дальнейшем повышении степени деформации интенсивность упрочнения снижается. Значительное повышение сопротивления деформации при холодной прокатке сопровождается снижением характеристик пластичности.

Перед термообработкой и отделочными операциями полосы, смотанные в рулоны, разрезают на листы. Полосы могут иметь утолщенные концы, кромки часто имеют трещины, забоины и зазубрины, помятости. Данные дефекты должны быть полностью удалены. Разрезка производится на линиях резки.

Прокатываемые алюминиевые сплавы подвергаются различным видам термической обработки для достижения следующих целей:

- устранить неоднородность структуры, вызванную интенсивным развитием внутрикристаллической ликвации в металле во время его затвердевания, а также снять термические напряжения, возникающие в результате резкого охлаждения при литье;

- снять нагартовку, получаемую при холодной прокатке;
- получить заданные механические свойства.

Листовой материал имеет следующие виды термообработки:

- гомогенизирующий – отжиг (гомогенизация) — длительное выдерживание при высоких температурах для улучшения литой структуры, повышения пластичности и улучшения свойств сляба при горячей прокатке;

- отжиг – термическая обработка при температурах выше температуры рекристаллизации, имеющая своей целью разупрочнение и снятие остаточных напряжений;

– низкотемпературный отжиг, возврат — термическая обработка при температурах настолько низких, что полной рекристаллизации металла не происходит; применяется для получения у термически необрабатываемых сплавов состояний, промежуточных между отжигом и нагартовкой;

– закалка — заключается в растворении упрочняющих фаз нагревом и в фиксации твердого раствора резким охлаждением;

– старение или дисперсионное твердение — термическое упрочнение, протекает во времени; старение, происходящее при комнатной температуре, называется естественным старением, а старение, происходящее в течение определенного промежутка времени при повышенных температурах (100—200° С), называется искусственным старением.

Плоские полуфабрикаты из термоупрочняемых сплавов после проведения закалки подвергаются правке растяжением с регламентированной степенью остаточной деформации для придания необходимой плоскостности и снижения остаточных напряжений, образовавшихся в процессе резкого закалочного охлаждения. Правка производится в правильно растяжных — машинах. При правке растяжением напряжения достигают предела текучести материала, возникает незначительное повышение прочностных свойств.

Прокатанные до окончательной толщины листы подвергаются ряду отделочных операций.

Иногда для улучшения качества листов применяется травление и обезжиривание.

Снятие коробления листов обычно достигается в результате следующей обработки:

– правки на роликовых правильных машинах с целью устранения грубого коробления;

– прогладки на прогладном стане для полного снятия коробления, волнистости по кромкам и получения гладкой глянцевой поверхности;

–правки растяжением на гидравлических растяжных машинах.

Ввиду высоких требований полуфабрикаты подвергаются жесткому контролю как механических свойств, так и качества поверхности и выкатки.

Механические свойства испытываются на образцах, отрезанных на линии резки. В основном испытываются предел прочности, предел текучести и относительное удлинение.

Качество поверхности определяется визуально. Качество выкатки определяется путем укладки на контрольный стол либо при помощи линейки для измерения неплоскостности. Отставание от плоскости не должно превышать определенных величин, указанных в стандарте на продукцию.

На поверхность наносится маркировка при помощи краски или ударным методом. Перед упаковкой в ящики листы и другой плоский прокат могут быть покрыты специальной консервационной смазкой для защиты от коррозии во время перевозки и длительного хранения.

2.2 Технология правки растяжением

Материалы ограниченного доступа

3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Новые патентные разработки в области прокатки плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

По данным патента РФ № 2363755, обладатель – Каменск-Уральский металлургический завод [45].

Изобретение относится к области металлургии, преимущественно к способам радиационной модификации листового проката из алюминиевых сплавов, и предназначено для устранения нагартовки (наклепа), снятия внутренних напряжений и улучшения структуры в процессе его получения.

Одними из наиболее трудоемких и энергоемких операций в ходе производства листового проката из алюминиевых сплавов являются технологические операции, связанные с необходимостью снятия нагартовки, возникающей в процессе холодной прокатки. Под нагартовкой понимают упрочнение листового проката в ходе холодной прокатки, сопровождающееся понижением пластичности, что делает невозможной дальнейшую прокатку. Для устранения этого явления листовой прокат обычно подвергают термической обработке в определенном интервале температур.

Известен традиционный способ получения листового проката из алюминиевых сплавов, включающий стадию его холодной прокатки до нагартованного состояния и стадию термической обработки (промежуточный отжиг), причем эти стадии повторяют до получения листового проката требуемой толщины. Отжиги проводят при температуре 310-335°C. Лучшие антикоррозионные свойства при таком способе обеспечиваются при медленном нагреве до температуры отжига и последующем медленном охлаждении. Для проведения каждого отжига изделие, например, в виде рулонов или пакетов из нарезанных листов алюминиевого сплава помещают в печи, что приводит к большим временным и энергетическим затратам: один из самых трудоемких этапов при проведении этих операций – снятие

прокатанных рулонов с прокатного стана, транспортировка и размещение рулонов в печи. Чем меньше толщина листового проката, тем большее число отжигов необходимо.

Очевидными недостатками этого способа являются высокая трудоемкость и энергоемкость процесса. Еще одним недостатком является невозможность устранения в ходе этих процессов некоторых интерметаллидов кристаллизационного происхождения, например $Al_6(Fe, Mn)$. Наличие в структуре сплава грубых интерметаллидов $Al_6(Fe, Mn)$ отрицательно влияет на свойства сплавов, в частности снижает их пластичность.

Способ изготовления изделия из композиции металлического сплава, выбранного из группы, состоящей из алюминидов железа, никеля и титана, включает стадии:

(а) получения изделия, которое подвергается наклепу при холодной обработке композиции металлического сплава в такой степени, что на нем образуется поверхностно-упрочненная зона,

(б) термической обработки подвергнувшегося наклепу изделия путем нагрева его в печи таким образом, что оно подвергается мгновенному отжигу продолжительностью менее одной минуты,

и необязательно (в) - повторения стадий (а) и (б) до тех пор, пока не будет получено изделие требуемого размера.

Одним из вариантов изобретения является способ, согласно которому мгновенный отжиг проводится нагреванием подвергнувшегося наклепу изделия с помощью инфракрасного излучения.

Холодная обработка заключается в холодной прокатке, а изделие, которое подвергается наклепу, в частности, представляет собой лист, полосу, круглый или ленточный профиль либо проволоку. Стадия мгновенного отжига заключается в нагревании подвергнувшегося наклепу изделия до температуры не менее $400^{\circ}C$ на время менее 45 с.

В вышеизложенном способе снятие нагартовки также проводят путем термической обработки. Несмотря на то, что нагрев и выдержка в печи занимают менее одной минуты, изделия надо доставить в печь, в которой должна поддерживаться высокая температура, чтобы осуществить указанный быстрый нагрев. А это связано с определенными затратами времени, труда и электроэнергии.

В ходе этих процессов удастся снять нагартовку только в поверхностно-упрочненной зоне, а также невозможно устранить некоторые интерметаллиды кристаллизационного происхождения, например $Al_6(Fe, Mn)$. Таким образом, задачей изобретения является создание высокопроизводительного способа получения листового проката из алюминиевых сплавов.

Предлагаемый способ получения листового проката из алюминиевых сплавов включает следующие стадии:

- холодную прокатку до нагартованного состояния;
- кратковременную поверхностную обработку, и, преимущественно, повторение стадий до получения листового проката требуемой толщины.

Поверхностную обработку при этом проводят путем облучения пучком ионов с атомной массой $A \geq 10$ а.е.м. Алюминиевым сплавом может являться сплав системы Al-Mg, который содержит 5,8-6,8 мас.% Mg (т.н. магналии). Листовой прокат в процессе облучения можно непрерывно и равномерно перемещать относительно ионного пучка. Облучение поверхности можно производить одновременно с двух сторон.

Продолжительность облучения определялась составом сплава, толщиной обрабатываемого листа, а также тем, с двух сторон или с одной стороны обрабатывался лист. Кроме этого, самое главное, время облучения, необходимое для достижения одного и того же состояния сплава, зависит от плотности ионного тока. Чем выше плотность ионного тока, тем меньше время облучения. В результате проведенных авторами экспериментов

оказалось, что при одинаковых параметрах облучения результаты для неподвижной и движущейся равномерно полосы листового проката абсолютно идентичны. Предлагаемый способ принципиально отличается от всех известных, в том числе от способов, включающих традиционный термический отжиг в печи, и от связанных с длительным или кратковременным нагревом изделий, а также от уже применяемых в настоящее время способов, включающих ионно-лучевую обработку изделий, тем, что он использует радиационно-динамическое воздействие ускоренных ионов, а не эффекты, связанные с обычным нагревом, ионным легированием или образованием радиационных дефектов.

Действительно, пучки ионов низких и средних энергий (от нескольких единиц до нескольких сотен кэВ) используются в настоящее время с целью поверхностного легирования (внедрения ионов в слои толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен нм), а также для создания в поверхностных слоях такой же толщины высоко дефектных (сильно неравновесных - вплоть до аморфных) состояний, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости, увеличение микротвердости, износостойкости, а также изменение некоторых других поверхностных свойств материалов – модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками.

После цикла прокатки, который приводит к нагартовке сплава, что делает невозможной дальнейшую прокатку, вместо традиционного промежуточного отжига при $T=240-250^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч проведено облучение поверхности листа из сплава ВД1 ионами Ar^{+} с энергией 40 кэВ, плотностью ионного тока 400 мкА/см^2 . Образец облучали с двух сторон в течение 30 с. Толщина листа составляла 1,5 мм. Образец облучали с двух сторон в течение 30 с. Толщина листа составляла 4 мм.

Результаты механических испытаний исходных, отожденных и облученных образцов сплава ВД1 показали, что после ионно-лучевой

обработки листов сплава ВД1 наблюдается существенное разупрочнение сплава, близкое к тому, которое достигается при промежуточном термическом отжиге.

Электронно-микроскопическое исследование нагартованного сплава ВД1 свидетельствует о наличии в нем дислокационной ячеистой структуры с узкими границами между отдельными ячейками. Диаметр ячеек составляет 0.5-2 мкм.

После двухчасового отжига при температурах 240-250°C в сплаве ВД1 образуется практически однородная субзеренная структура со средним диаметром субзерен 0.5-2 мкм.

После облучения в сплаве обнаружена кристаллическая структура с размером зерен более 10 мкм. Также в ходе облучения произошел распад твердого раствора с выделением высокой плотности равноосных частиц фазы Θ (CuAl_2) диаметром от 10-20 нм.

Протекание при ионном облучении процессов распада пересыщенного твердого раствора сплава ВД1 одновременно с процессами рекристаллизации не препятствует разупрочнению сплава несмотря на высокую плотность равномерно распределенных выделений упрочняющей фазы. В результате получают значения механических свойств, аналогичные при промежуточном отжиге, и обеспечивается возможность дальнейшей прокатки листов указанного сплава.

Таким образом, как показано на примерах, предлагаемый способ выгодно отличается от известных.

Техническим результатом изобретения является то, что предложенный способ позволяет получать листовой прокат из алюминиевых сплавов в непрерывном цикле, без остановок технологического процесса, существенно снизить (в 2-3 раза) энергоемкость и трудоемкость процесса, а также на 1-2 порядка уменьшить его длительность.

Технический результат, достигаемый изобретением, заключается и в том, что в процессе получения листового проката происходит устранение нагартовки не только в поверхностном слое, но и по всей его толщине. Это приводит к тому, что изменяются не только твердость в поверхностном слое, но и макроскопические механические свойства, характеризующие весь объем материала, такие как предел прочности, предел текучести и относительное удлинение. При этом происходит не только устранение нагартовки, но и улучшение структуры листового проката путем растворения грубых интерметаллидов кристаллизационного происхождения, отрицательно влияющих на его свойства и не растворяющихся при традиционных отжигах.

Для осуществления заявляемого способа использовался плазменный эмиттер ионов, далее ионный источник. Ионный источник содержит полый цилиндрический катод, в одном из торцов которого выполнено многоапертурное эмиссионное окно, а на другом с помощью проходного изолятора соосно с катодом установлен штыревой анод. С внешней стороны катода соосно с катодом установлен штыревой соленоид, создающий в полости магнитное поле.

Пример получения листового проката из алюминиевого сплава ВД1 системы Al-Cu-Mg (дуралюмины).

Слиток, отлитый из сплава ВД1 системы Al-Cu-Mg, прошел ряд технологических операций для получения листового проката толщиной листа 7,0 мм. Далее лист был подвергнут холодной прокатке до толщины 1,0 мм. Холодная прокатка листа осуществлялась в стане холодной прокатки. Дальнейшее проведение холодной прокатки было невозможным вследствие образовавшегося нагартованного состояния листа. Для снятия этого нагартованного состояния лист был подвергнут облучению ионами Ar^+ с энергией 40 кэВ, плотность ионного тока 400 мкА/см², с использованием ионного источника.

Обработка ионами осуществлялась с двух сторон листа. Облучение производилось в течение 10 с. Лист в процессе обработки непрерывно и равномерно перемещался относительно пучка ионов, т.е. относительно ионного источника. В результате такой обработки полностью снималось нагартованное состояние листа и внутренние напряжения, возникающие в ходе холодной прокатки. В дальнейшем лист был подвергнут холодной прокатке до требуемой толщины, равной 0,5 мм.

Таким образом, листовой прокат толщиной 0,5 мм из сплава ВД1 был получен в результате двух стадий холодной прокатки и одного кратковременного облучения ионами (заменяв промежуточный отжиг в электропечи при температуре $T=240-250^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч, традиционно применяемый для получения листового проката толщиной 0,5 мм из сплава ВД1).

Микроструктура листов сплава ВД1 представлена на рисунке 7: а – после нагартовки, б – после промежуточного отжига в печи, в – после ионно-лучевой обработки.

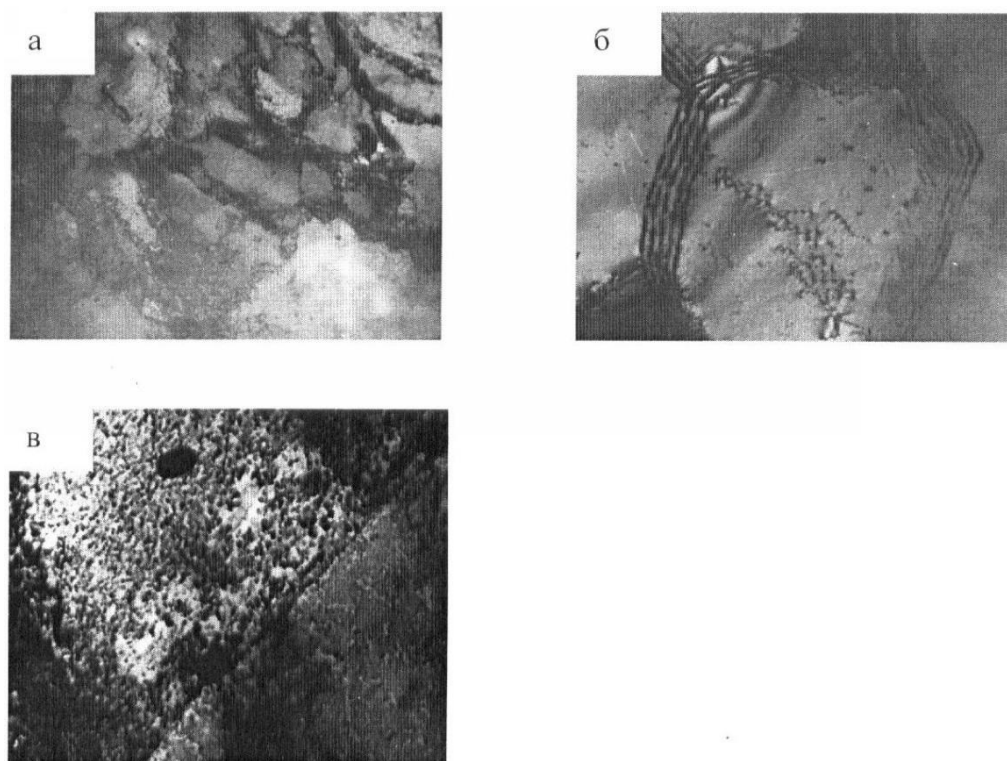


Рисунок 7 – Микроструктура листов из сплава ВД1

Результаты механических испытаний исходных и облученных образцов сплава ВД1 приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Механические свойства и структура листов из сплава ВД1

Виды обработки	Структура	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Нагартовка	ячеистая	255	246	6,5
отжиг (в течение 2 часов)	зеренная	76	-	59
обработка пучком ионов Ar^+	зеренная	105	81	43

По данным патента РФ № 2622195, обладатель – ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» [46].

Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления высокопрочных тонких листов и полос из алюминиевых сплавов. Способ включает холодную прокатку полосы в двух валках при рассогласовании их окружных скоростей до суммарной степени деформации 75-95% с минимальной единичной степенью деформации 50%. Повышение прочностных свойств изделий за счет создания фрагментированной структуры металла с высокой плотностью дислокаций в условиях отсутствия термически активационных процессов разупрочнения при деформационном разогреве металла в очаге деформации обеспечивается путем проведения прокатки с регламентированными окружными скоростями валков, при этом максимальную единичную степень деформации при прокатке полосы задают не более 75%, а после каждого прохода полосу охлаждают до температуры 20–25°C.

Изобретение относится к обработке металлов давлением и может быть использовано для изготовления высокопрочных тонких листов и полос из алюминиевых сплавов.

Известен способ холодной многопроходной прокатки тонких лент из алюминиевых сплавов, согласно которому прокатку проводят со степенью деформации 45-57% в каждом из двух последних проходов и со скоростью не менее 10 м/с в последнем проходе с обеспечением температуры 140-160°C при смотке ленты в рулон.

Недостатком данного способа является низкий уровень напряжений и деформаций сдвига в очаге деформации, а также существенный разогрев металла при прокатке с большой скоростью, что приводит к разупрочнению металла и невозможности получения фрагментированной структуры металла с высокой плотностью дислокаций. В результате этого прочностные свойства изготавливаемых тонких лент из алюминиевых сплавов значительно снижаются.

Наиболее близким аналогом к заявляемому объекту является способ производства холоднокатаной полосы из различных металлов и сплавов, включающий холодную прокатку тонкой полосы до суммарной степени деформации 75-95% с единичной степенью деформации не менее 50% в валках с шероховатостью 6,0-12,0 мкм Ra и соотношением окружных скоростей $V_1 \geq 2V_2$

Недостатком известного способа являются низкие прочностные свойства изготавливаемых тонких полос, например, из алюминиевых сплавов, за счет того, что при прокатке полосы с вышеуказанными режимами происходит разогрев металла, который может достигнуть температуры рекристаллизации или даже плавления. Это приводит к снижению напряжений сжатия и деформаций сдвига в очаге деформации, а также к разупрочнению металла вследствие роста зерна и аннигиляции дислокаций. Кроме того, при температурах, близких к температуре солидус, возможно образование трещин и горячее охрупчивание металла, что также снижает прочностные свойства изготавливаемой продукции.

Задача, решаемая изобретением, заключается в повышении прочностных свойств изготавливаемых тонких полос и листов из алюминиевых сплавов за счет создания фрагментированной структуры металла с высокой плотностью дислокаций в условиях отсутствия термически активационных процессов разупрочнения при деформационном разогреве металла в очаге деформации.

Технический результат, обеспечивающий решение поставленной задачи, заключается в создании оптимальных температурных условий в очаге деформации при одновременном формировании в нем сложной схемы напряженно-деформированного состояния, включающей высокие напряжения всестороннего сжатия и деформации сдвига.

Поставленная задача решается тем, что при холодной прокатке тонкой полосы в двух валках при рассогласовании их окружных скоростей до суммарной степени деформации 75-95% с минимальной единичной степенью деформации 50%, согласно изобретению, окружные скорости валков задают из соотношений:

$$V_1 \leq \sqrt{\frac{3R(h_0 - h_1)}{4(\ln_{h_1}^{h_0})^2 + 1}}, \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 \frac{h_1}{h_0} \left(1 + \frac{h_0 + h_1}{4\sqrt{3R(h_0 - h_1)}} \right), \quad (2)$$

где V_1 - окружная скорость первого валка, мм/с;

V_2 - окружная скорость второго валка, мм/с;

R - радиус валков, мм;

h_0 - толщина полосы до прокатки, мм;

h_1 - толщина полосы после прокатки, мм,

при этом максимальную единичную степень деформации при прокатке полосы задают не более 75%, а после каждого прохода полосу охлаждают до температуры 20-25°C.

Известен способ изготовления плоского проката из алюминия, согласно которому прокатку проводят с низкой скоростью (менее 0,1 м/с) для повышения пластичности металла.

В заявляемом способе окружные скорости валков, задаваемые из соотношений, приведенных в формуле изобретения, также как и в известном способе предназначены для создания необходимых температурных условий в очаге деформации, способствующих повышению пластичности алюминиевых сплавов.

Известен способ изготовления листов из алюминиевых сплавов, согласно которому холодную прокатку проводят с высокой степенью деформации (45-70%) для повышения изотропности свойств.

В заявляемом способе высокая единичная степень деформации 50-75% также, как и в известном способе, предназначена для повышения изотропности свойств.

Известен также способ холодной прокатки алюминиевых сплавов, согласно которому между проходами металл охлаждают до 80-20°С для повышения стабильности механических свойств.

В заявляемом способе охлаждение полосы после каждого прохода до температуры 20–25°С также, как и в известном способе, предназначено для повышения стабильности механических свойств.

Однако, наравне с вышеуказанными известными техническими свойствами, в заявляемом способе совокупность отличительных признаков проявляет новый технический результат, заключающийся в создании оптимальных температурных условий в очаге деформации при одновременном формировании в нем сложной схемы напряженно-деформированного состояния, включающей высокие напряжения всестороннего сжатия и деформации сдвига. Это позволяет предотвратить возникновение термически активационных процессов разупрочнения при повышенном деформационном разогреве металла в очаге деформации и

обеспечить при этом получение стабильной фрагментированной структуры металла с высокой плотностью дислокаций, в результате чего прочностные свойства изготавливаемых тонких полос и листов из алюминиевых сплавов значительно повышаются.

Способ тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов осуществляют следующим образом.

Холодную прокатку тонкой полосы из алюминиевого сплава осуществляют в двух приводных валках при рассогласовании их окружных скоростей до достижения суммарной степени деформации 75-95% с единичной степенью деформации 50-75%. Прокатку проводят в условиях высокого контактного трения без использования технологической смазки.

При этом окружную скорость первого валка задают из условия (1).

Это приведет к снижению деформационного разогрева металла и созданию оптимальных температурных условий в очаге деформации, что позволит ограничить указанный разогрев алюминиевого сплава до температуры, не превышающей 100°C, и предотвратить возникновение термически активационных процессов разупрочнения - динамический возврат и динамическую рекристаллизацию. Кроме того, для создания в очаге деформации сложной схемы напряженно-деформированного состояния, включающей высокие напряжения всестороннего сжатия и деформации сдвига, окружную скорость второго валка задают согласно соотношению (2).

Это обеспечит получение фрагментированной структуры металла с высокой плотностью дислокаций.

Для поддержания в очаге деформации оптимальных температурных условий целесообразно в процессе прокатки после каждого прохода осуществлять охлаждение полосы до температуры 20-25°C. Таким образом, совокупность отличительных признаков заявляемого способа позволит получить стабильную фрагментированную структуру металла с высокой

плотностью дислокаций и, соответственно, повысить прочностные свойства изготавливаемых тонких полос и листов из алюминиевых сплавов.

Осуществлять тонколистовую прокатку алюминиевых сплавов с окружной скоростью первого валка

$$V_1 > \sqrt{\frac{3R(h_0 - h_1)}{4(\ln \frac{h_0}{h_1})^2 + 1}}, \quad (2)$$

или с единичной степенью деформации более 75% нецелесообразно, так как при этом существенно повышается температура металла в очаге деформации, что приводит к возникновению термически активационных процессов разупрочнения вследствие аннигиляции дислокаций при динамическом возврате или динамической рекристаллизации. Кроме того, деформационный разогрев в очаге деформации может достигнуть температуры, близкой к температуре солидус, в результате чего возможно образование трещин и горячее охрупчивание металла, что снизит прочностные свойства изготавливаемых полос и листов из алюминиевых сплавов.

Если в процессе прокатки после каждого прохода температура охлаждения полосы из алюминиевого сплава будет превышать 25°C, то в последующих проходах суммарный деформационный разогрев металла в очаге деформации превысит 100°C, что приведет к разупрочнению полосы вследствие аннигиляции дислокаций при динамическом возврате или динамической рекристаллизации.

Охлаждать полосу до температуры ниже 20°C нецелесообразно, так как это усложнит технологический процесс и увеличит себестоимость готовой продукции вследствие необходимости использования специальных охладителей.

Для обоснования преимуществ заявляемого способа тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов были проведены 9 экспериментов, в которых исходную заготовку в виде полосы толщиной $h_0=4,0$ мм из алюминиевого

сплава марки АМг6 прокатывали в двух приводных валках с одинаковым радиусом 200 мм. Прокатку проводили за несколько проходов до суммарной степени деформации 93,75% с единичной степенью деформации ε от 50 до 75%. Конечная толщина полосы во всех экспериментах составляла 0,25 мм. Прокатку проводили на сухих валках без использования технологической смазки, снижающей трение.

Эксперименты №1-3 проводили в соответствии с заявляемыми режимами, указанными в формуле изобретения; эксперименты №4-8 - с режимами, выходящими за минимальные и максимальные заявляемые пределы, а эксперимент №9 - по прототипу. Режимы прокатки приведены в таблице 7, результаты испытаний приведены в таблице 8.

Таблица 7 – Режимы прокатки

Первый проход							
№ п/п		h_0	h_1	ε	V_1	V_2	Охлаждение полосы после прокатки до температуры
		мм	мм	%	мм/сек		С°
Заявляемый	1	4	2,0	50,0	20	10,6	20
	2	4	1,5	62,5	17	6,8	22
	3	4	1,0	75,0	14	3,7	25
	4	4	0,9	77,5	13	3,2	30
	5	4	2,2	45,0	30	17,3	33
	6	4	2,2	45,0	21	15,0	26
	7	4	0,8	80,0	13	2,7	60
	8	4	0,8	80,0	13	8,0	55
По прототипу	9	4	2,0	50,0	200	100	-

Продолжение таблицы 7

Второй проход							
№ п/п		h ₀	h ₁	ε	V ₁	V ₂	Охлаждение полосы после прокатки до температуры
		мм	мм	%	мм/сек		С°
Заявляемый	1	2,0	1,0	50,0	14	7,4	21
	2	1,5	0,6	60,0	11	4,6	22
	3	1,0	0,25	75,0	7	1,8	24
	4	0,9	0,25	72,2	7	2,0	25
	5	2,2	1,0	54,5	14	6,7	39
	6	2,2	1,0	54,5	14	6,7	36
	7	0,8	0,25	68,7	7	2,3	77
	8	0,8	0,25	68,7	7	5,0	63
По прототипу	9	2,0	1,0	50	200	100	-
Третий проход							
№ п/п		h ₀	h ₁	ε	V ₁	V ₂	Охлаждение полосы после прокатки до температуры
		мм	мм	%	мм/сек		С°
Заявляемый	1	1,0	0,5	50,0	10	5,2	22
	2	0,6	0,25	58,3	7	3,0	21
	3	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-
	5	1,0	0,5	50,0	15	7,7	24
	6	1,0	0,5	50,0	10	8,0	21
	7	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-
По прототипу	9	1,0	0,5	50	200	100	-

Продолжение таблицы 7

Четвертый проход							
№ п/п		h ₀	h ₁	ε	V ₁	V ₂	Охлаждение полосы после прокатки до температуры
		мм	мм	%	мм/сек		С°
Заявляемый	1	0,5	0,25	50,0	7	3,6	23
	2	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-
	5	0,5	,025	50	10	5,1	25
	6	0,5	,025	50	7	5,0	24
	7	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-
По прототипу	9	0,5	0,25	50	200	100	-

Таблица 8 – Результаты испытаний механических свойств

№ п/п		Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
Заявляемый	1	410	512	7,3
	2	405	509	7,0
	3	414	518	7,6
	4	360	468	8,5
	5	368	435	8,4
	6	345	455	8,1
	7	366	440	8,7
	8	372	445	8,9
По прототипу	9	342	420	8,6

Результаты испытаний показали, что полоса из алюминиевого сплава, изготовленная по заявляемому способу (эксперимент №1-3), имеет

прочностные свойства на 18-23% выше прочностных свойств прототипа (эксперимент №9).

Изготавливать полосу из алюминиевого сплава по режимам, выходящим за заявляемые пределы (эксперименты №4-8), нецелесообразно, так как прочностные свойства полосы значительно снижаются.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что заявляемый способ тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов работоспособен, может найти широкое применение в области прокатки высокопрочных изделий и, следовательно, соответствует условию патентоспособности «промышленная применимость».

3.2 Решение задачи правки растяжением полос из алюминиевых сплавов методом конечных элементов

3.2.1 Описание постановки задачи

Решение осуществляли в программном комплексе ABAQUS (© Dassault Systèmes) при количестве конечных элементов менее 1000, что соответствует свободной лицензии. Деформируемая среда – упруго-пластическая. Физико-механические свойства материала соответствуют характеристикам алюминиевого сплава АМг3 в холодном состоянии, заданы плотность $2,66 \text{ г/см}^3$, модуль упругости 71 ГПа, коэффициент Пуассона 0,34, а также зависимость напряжения пластического течения от степени деформации. Моделируемое пространство 2D Planar, тип Deformable.

Применили плоскую схему деформированного состояния, которая предполагает отсутствие перемещений по одной из координат. Как правило, правку растяжением применяют при наличии в прокате кривизны, наблюдаемой вдоль направления прокатки. Поэтому геометрический образ объекта для выполнения расчетов представлял собой искривленный вдоль длины профиль (рисунок 8, а). Он отражен на рисунок 8, б фрагментом, представляющим собой правую половину полосы. Здесь же показана сетка конечных элементов, ее тип Quad-dominated.

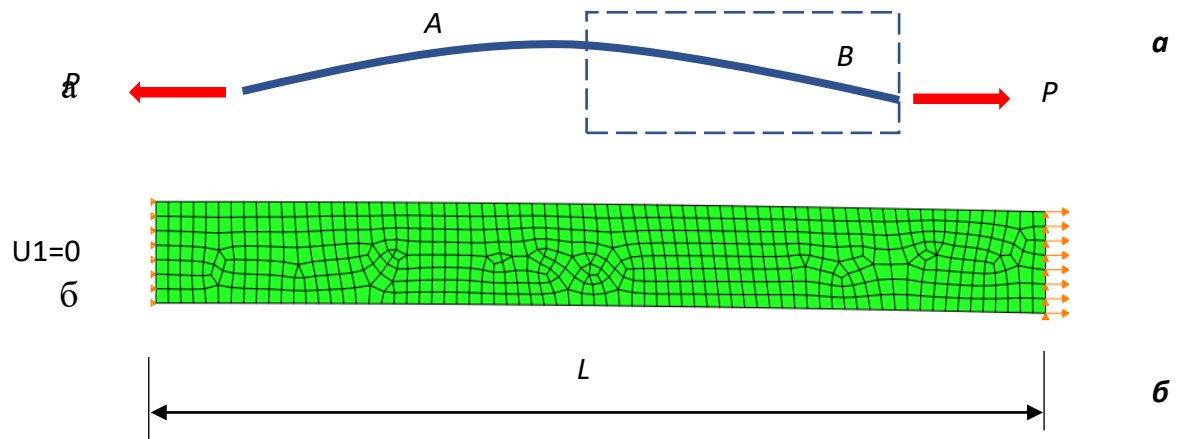


Рисунок 8 - Изогнутый профиль полосы A, подвергается растяжению силой P (стрелки), с выделением (штрих-пунктир) правой половины полосы (а) и правая половина полосы с граничными условиями в горизонтальных перемещениях U1 и сеткой конечных элементов (б)

Предполагается, что искривленная полоса A зажата захватами правильной машины слева и справа. Использован принцип симметрии нагружения. Для этого выделена правая половина полосы B, ее правый торец подвергают горизонтальному перемещению U1, а левый торец перемещению не подвергается: $U1 = 0$, что характерно для середины полосы. Далее цифровые символы после обозначения параметров соответствуют направлению осей: 1 – горизонтальное направление, 2 – вертикальное направление.

Длина половины полосы равна $L = 2000$ мм, перемещение U1 на правой кромке равно 60 мм, т.е. относительное удлинение в состоянии нагрузки составляет 3%. Толщина полосы равна 200 мм. Исходный прогиб полосы равен 20 мм. Он связан с радиусом кривизны профиля соотношениями, которые можно определить, рассматривая схему рисунок 9, на которой изогнутая полоса длиной 2L имеет стрелу прогиба δ . Рассматривая прямоугольный треугольник со сторонами L, R, $R - \delta$, получим равенство:

$$L^2 = R^2 - (R - \delta)^2 = R^2 - R^2 + 2R\delta - \delta^2 = 2R\delta - \delta^2. \quad (4)$$

Поскольку $\delta \ll R$, то

$$R = \frac{L^2}{2\delta} . \quad (5)$$

Например, при $L = 2000$ мм и $\delta = 200$ мм получим по формуле (5) $R = 100000$ мм, что позволяет выполнить построения профиля полосы.

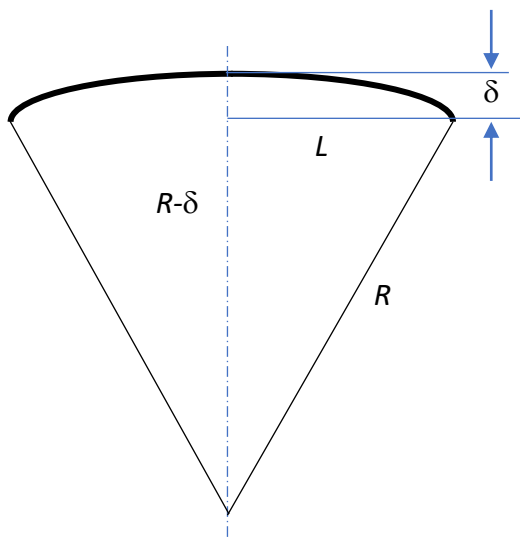


Рисунок 9 - Схема к расчету радиуса кривизны R при стреле прогиба полосы δ

3.2.2 Решение задачи

Процесс правки связан с несколькими его сопровождающими явлениями: упругой и пластической деформациями, удлинением и разгибом.

На рисунке 10, а приведено распределение горизонтальной составляющей вектора перемещений U_1 (правая половина полосы). Видно нарастание перемещений от центра полосы к периферии по длине. В этом же направлении нарастает наклон границ областей равного уровня. При равной горизонтальной координате частицы на нижней поверхности полосы имеют большее горизонтальное перемещение.

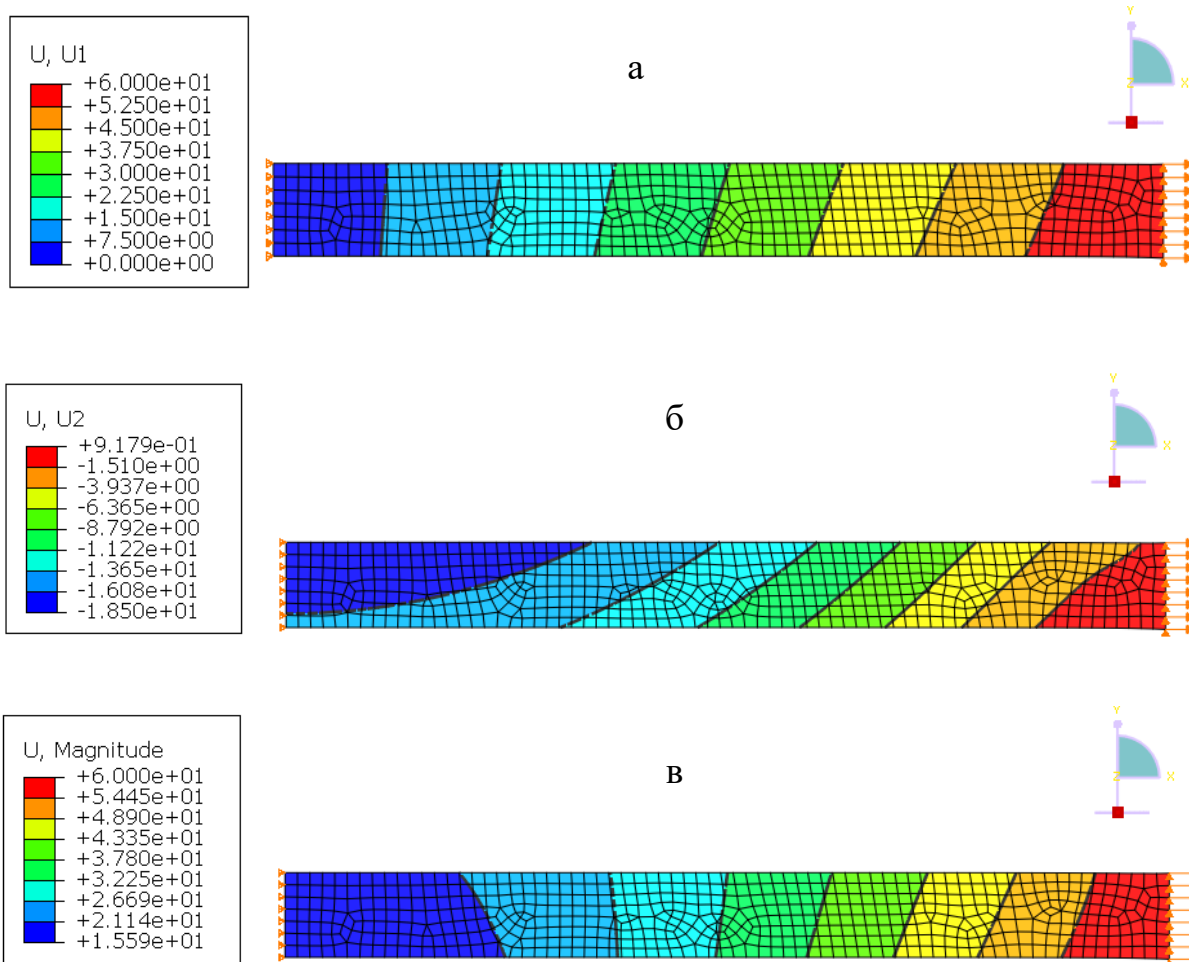


Рисунок 10 - Распределение горизонтальной (а), вертикальной (б) составляющей и магнитуды (в) вектора перемещений (правая половина полосы)

Частицы полосы при разгибе перемещаются вниз, поэтому вертикальная компонента вектора перемещений U_2 имеет отрицательные значения (рисунок 10, б). Наклон границ областей равного уровня магнитуды перемещений оказался различным для центральной и периферийной областей полосы (рисунок 10, в).

Распределение компонентов тензора пластических деформаций PE представлено на рисунке 11. Здесь индекс 1 соответствует горизонтальному направлению, а индекс 2 – вертикальному направлению. Область полосы, расположенная справа, имеет высокий градиент параметра, что обусловлено соответствующим граничным условием. Места защемления полосы захватами правильной машины подлежат обрезке, поэтому их деформированное состояние может в данном случае не учитываться при анализе.

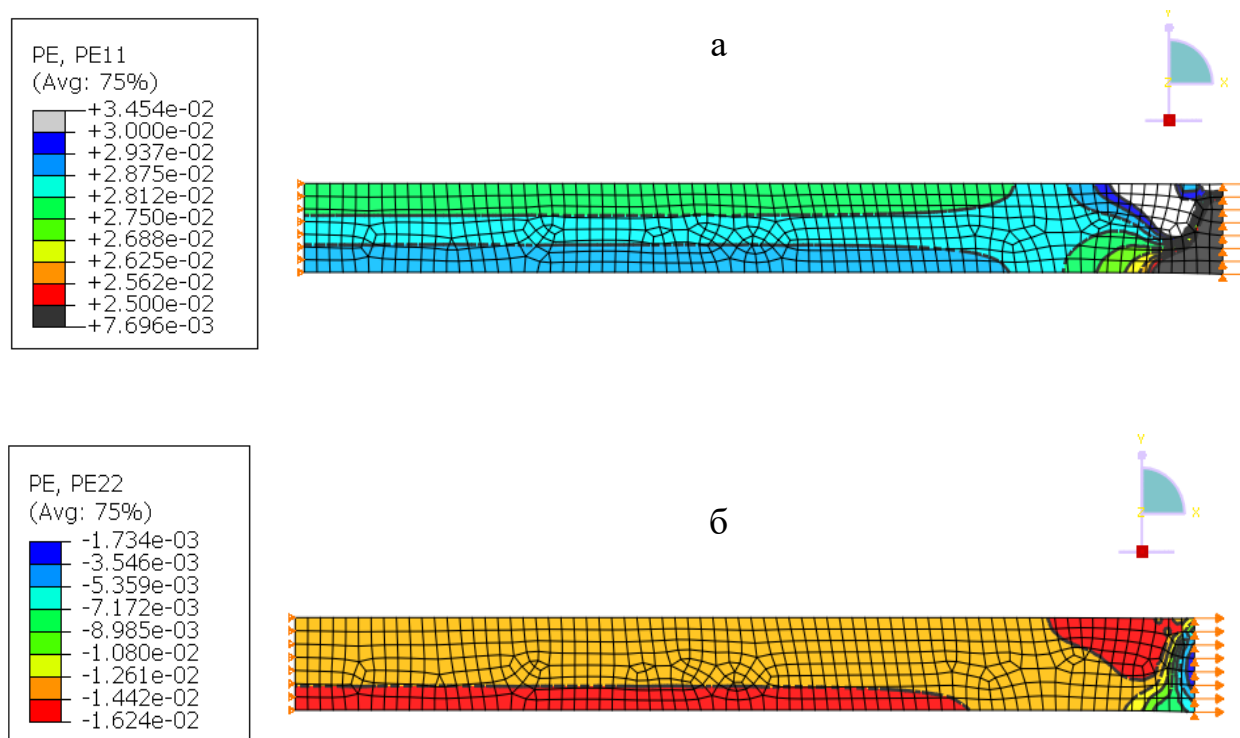


Рисунок 11 - Распределение компонентов тензора пластических деформаций PE11 и PE22
(правая половина полосы)

Компонента PE11 имеет положительные значения, что соответствует деформации растяжения (рисунок 11, а). На нижней поверхности полосы деформация PE11 оказывается выше, чем на верхней поверхности. Такая же закономерность характерна и для компоненты PE22 (рисунок 11, б), если взять ее по модулю. Последний факт является закономерным, поскольку компоненты PE11 и PE22 в условиях плоской деформации связаны условием несжимаемости: $PE11 + PE22 = 0$.

На рисунке 12 показано распределение параметра PRESSURE, который соответствует понятию среднего гидростатического напряжения с обратным знаком.

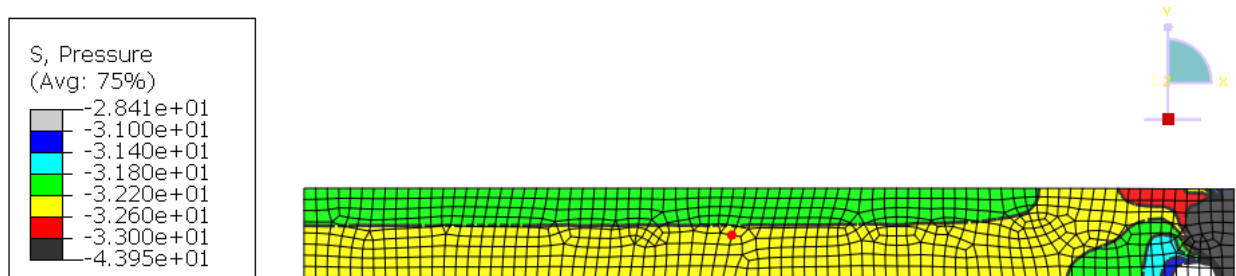


Рисунок 12 – Распределение параметра PRESSURE (правая половина полосы)

Здесь видно, что имеется граница между областью с большими по модулю значениями параметра (нижняя часть полосы) и областью с меньшими по модулю значениями параметра (верхняя часть полосы). С позиции обеспечения лучшего уровня пластических свойств предпочтительны пониженные по модулю значения параметра, поэтому появление трещин скорее можно ожидать на нижней части полосы. Действительно, если представить себе, что рассматривается только разгиб полосы, то на выпуклой (верхней) части полосы должны появиться напряжения сжатия, а на вогнутой части (нижней) – напряжения растяжения. Тем самым нижняя часть полосы оказывается в неблагоприятной ситуации с позиции разрушения.

3.2.3 Выводы из решения задачи

В результате решения краевой задачи растяжения предварительно изогнутой полосы получены поля перемещений, деформаций и напряжений. Выявлено, что при наличии предварительного изгиба полосы правка растяжением приводит к появлению неоднородностей в распределении параметров, характеризующих деформированное и напряженное состояние. Компоненты вектора перемещений распределяются неоднородно по длине полосы, что приводит к неоднородному распределению компонентов тензора деформаций по толщине полосы.

Аналогичная ситуация возникает при анализе среднего нормального напряжения.

3.3 Анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов

3.3.1 Введение и описание методики измерений

Заготовка, предназначенная для правки, может иметь неоднородность распределения свойств по длине, ширине и толщине, что обусловлено схемой предыдущей обработки [30, 19]. Дополнительно под сомнением оказывается гипотеза об изотропности металла [5, 17, 28]. В результате при правке могут изменяться неоднородно по длине многие параметры, даже форма поперечного сечения. При правке толстых листов и плит выявлена анизотропия свойств не только до длине и ширине заготовок, но и по толщине [27].

Возникновение текстуры в самом процессе правки может приводить к нестабильности пластического течения металла [24, 34]. Различное воздействие оказывает правка растяжением на перераспределение остаточных напряжений в плоском прокате [36]. Сама правка предполагает, что заготовка перед операцией может иметь прогиб, поэтому верхний и нижний слои полосы могут получать различный уровень деформации [23].

Технологически можно различить два варианта правки: правка горячекатаных полос и правка закаленных полос. У этих двух вариантов могут оказаться существенно различным исходное состояние металла. Существующие неоднородности свойств металла в первом случае связаны с особенностями процесса горячей прокатки: неравномерностью распределения температуры и деформаций по сечению полосы [33, 37, 38]. Во втором случае большее влияние оказывают возможные неравномерности тепловых полей закалочного агрегата. В этой работе будут затронуты особенности осуществления только первого варианта.

Промышленный эксперимент выполняли на правильно-растяжной машине фирмы «SMS MEER» усилием 70 МН. Процесс правки растяжением заключается в растяжении плиты до определенной степени деформации.

Концы плиты неподвижно фиксируются в головках правильно–растяжной машины (далее ПРМ). При создании рабочего давления в гидравлических цилиндрах головки машины начинают раздвигаться, и происходит растяжение плиты, при этом создаются напряжения, превышающие предел текучести материала плиты.

Для задания данных в управляющий компьютер ПРМ и проверки соответствия геометрических параметров плит требованиям нормативной документации, производится измерение размеров: длины, ширины, толщины. В соответствии с требованиями технологических инструкций длина и ширина измеряются в одном месте, толщина – минимум в трех местах по одной кромке плиты. При выявлении большой разнотолщинности, утонченных или утолщенных концов плит измерения производятся с большей частотой, для обеспечения возможности определить границы области, имеющей существенные отличия по толщине. Продольная и поперечная кривизна плит измеряется минимум в трех местах по длине плиты.

В данной работе спектр измерений был расширен. Расширенная методика заключается в назначении большего количества контрольных точек на поверхности плиты и фиксации толщины полосы в этих контрольных точках до и после проведения правки. На рисунке 13 показано расположение контрольных точек с номерами 1, 2...9. В более полном исследовании в этих точках измерялось относительное удлинение полосы в результате проведения операции правки. В данном случае измерения касались точек с номерами 1, 4, 7, 3, 6, 9, что объясняется невозможностью подведения измерительных губок толщиномера к центральным слоям металла.

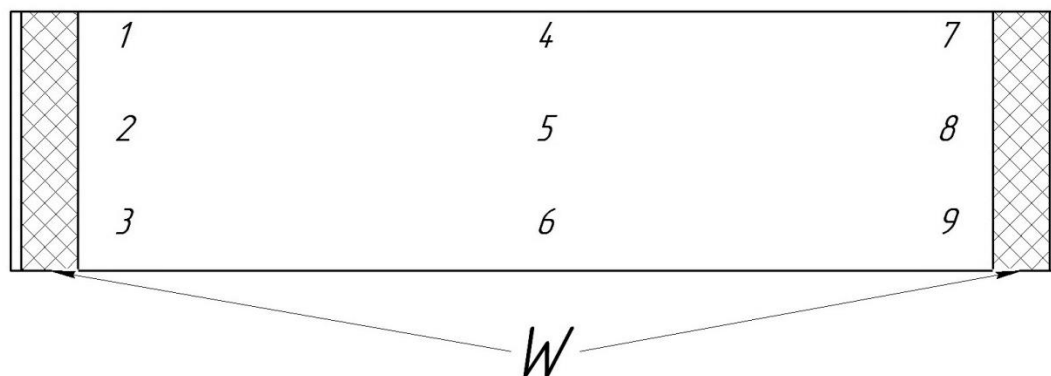


Рисунок 13 - Расположение контрольных точек измерений полосы (вид сверху): W – места расположения захватов растяжной машины

Измерения выполнены на 12 горячекатаных плитах из сплавов Д16, 5083, АМг3, АМг6 толщиной 25...130 мм. На каждой плите выполнено три измерения в каждой контрольной точке, контрольных точек на каждой плите шесть, при этом измерения выполнены до и после процесса правки, итого общая выборка чисел составила $12 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 3 = 432$. Полученные данные подвергнуты статистической обработке: в каждой точке выполняли усреднение трех измерений, в дальнейшем использовали дисперсионный и регрессионный анализ. Сами полосы получены на стане на стане горячей прокатки с диаметром рабочих валков 900 мм в реверсивном режиме. Применены температурные режимы по сплавам: Д16 430-450°C, 5083 430-470°C, АМг3 450-490°C, АМг6 430-460°C.

3.3.2 Описание используемых параметров

В отличие от лабораторных опытов промышленный эксперимент, пусть даже пассивный, имеет свои особенности. В реальном производстве принято оценивать деформации относительными деформациями, выраженными в процентах, в зарубежной литературе их называют инженерными, в отличие от логарифмических деформаций, называемыми истинными. Поэтому следует установить их соотношение, причем в трех координатах: по длине, по ширине и по толщине и выявить процент ошибки при переходе от одного описания к другому. Следующей задачей является установление параметров геометрии, которые наиболее легко и с достаточной степенью точности можно измерить в условиях цеха. Они окажутся другими, чем те, которые применяются в лабораторных условиях.

Для описания показателей процесса введены следующие обозначения: относительная деформация по толщине $\varepsilon_{h\%} = 100 * (h_0 - h_1)/h_0$, относительная деформация по длине $\varepsilon_{L\%} = 100 * (L_1 - L_0)/L_0$, относительная деформация по ширине $\varepsilon_{B\%} = 100 * (B_0 - B_1)/B_0$, где $h_0, h_1, L_0, L_1, B_0, B_1$ соответственно толщина, длина и ширина полосы до и после правки. Относительные деформации введены, поскольку они содержатся в технической документации на процесс правки. Например, рекомендованный диапазон остаточных относительных деформаций по длине составляет $\varepsilon_L = 1,0 \dots 3,0 \%$.

Относительная деформация по длине может быть выражена через степень деформации (логарифмическую) удлинения $\varepsilon_L = \ln (L_1/L_0)$ с использованием формулы

$$\varepsilon_{L\%} = 100 * (L_1/L_0 - 1) = 100 * (\exp (\ln(L_1/L_0)) - 1) = 100 * (\exp \varepsilon_L - 1), \quad (6)$$

отсюда

$$\varepsilon_L = \ln(\varepsilon_{L\%} / 100 + 1). \quad (7)$$

Если задать максимальное значение остаточной относительной деформации по длине $\varepsilon_L = 3,0 \%$ или в относительных единицах 0,0300, то ему соответствует рассчитанная по формуле (7) степень деформации удлинения 0,0295. Разница в величинах составляет $100 \cdot (0,0300 - 0,0295) / 0,0300 = 3 \%$. Это позволяет записать условие постоянства объемов не через логарифмические деформации, а через относительные деформации, которые используются в условиях производства, с ошибкой в расчетах не более 3%.

Отсюда условие постоянства объемов до и после правки

$$\varepsilon_{L\%} = \varepsilon_{h\%} + \varepsilon_{B\%}. \quad (8)$$

В работе измеряли значения толщин, что позволяло рассчитать $\varepsilon_{h\%}$. При известном значении $\varepsilon_{L\%}$ по формуле (8) возможно определение $\varepsilon_{B\%}$. Но более целесообразно сделать оценку, равны ли между собой значения $\varepsilon_{h\%}$ и $\varepsilon_{B\%}$. Если они равны, то пластическое течение металла осуществляется независимо от направления, то есть материал изотропен, если не равны – материал анизотропен.

Государственным стандартом ГОСТ 11701-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент) вводится понятие коэффициента пластической анизотропии:

$$R_L = \lg(B_0/B_1) / \lg(B_1 \cdot L_1 / (B_0 \cdot L_0)). \quad (9)$$

В данной формуле можно заменить отношение десятичных логарифмов на отношение натуральных логарифмов вследствие их пропорциональности и, используя условие постоянства объемов, отношение площадей $B_1 \cdot L_1 / (B_0 \cdot L_0)$ на отношение толщин h_0 / h_1

$$R_L = \ln(B_0/B_1)/\ln(h_0/h_1). \quad (10)$$

или для малых деформаций

$$R_L = \varepsilon_{B\%} / \varepsilon_{h\%} = (\varepsilon_{L\%} - \varepsilon_{h\%}) / \varepsilon_{h\%} = \varepsilon_{L\%} / \varepsilon_{h\%} - 1 \quad (11)$$

Здесь $\varepsilon_{L\%}$ задается как общее фактическое относительное удлинение при правке, а $\varepsilon_{h\%}$ рассчитывается как средняя величина при измерениях в назначенных точках. Для изотропного материала $R_L = 1$. В зарубежной литературе коэффициент R_L описывается как параметр Лэнкфорда (Lankford value). Наряду с оценкой по формуле (10) вводятся также понятия нормализованного параметра Лэнкфорда [14, 35], учитывающего измерения формоизменения образцов, вырезанных под углами 0, 45 и 90° в плоскости листа, а также коэффициента планарной анизотропии, учитывающего эти же углы.

3.3.3 Результаты измерений и их анализ

Объем выборки разделен на две части: точки измерений, расположенные на периферии, ближе к захватам и точки в центральной части заготовки. Соответственно показателям присвоены индексы «п» и «ц». В табл. 9 представлены средние величины толщин до и после правки h_0 , и h_1 , относительные деформации $\varepsilon_{L\%}$, $\varepsilon_{h\%ц}$ и $\varepsilon_{h\%п}$, коэффициенты пластической анизотропии $R_{Lц}$ и $R_{Lп}$ для различных номинальных значений $h_{0н}$ толщин полос, то есть толщин, соответствующих заказу потребителя, из таблицы, видно, что при правке стараются чаще всего получить полосу большей толщины, чем номинальное значение. Это обусловлено тем, что полосу с положительным отклонением по толщине можно вывести при повторной правке ближе к номинальному значению. Полосу меньшей толщины уже не удастся вернуть к номинальному значению.

Таблица 9 – Показатели правки растяжением при номинальных толщинах полос

Показатель	Номинальная толщина полосы $h_{0н}$, мм											
	25	40	60	90	130	130	44,45	45	70	100	101,6	110
h_0 , мм	25,1	40,4	60,7	91,2	131,9	132,1	44,8	45,3	70,9	100,6	103,4	110,6
h_1 , мм	24,9	39,9	60,2	90,8	130,5	131,2	44,1	44,9	70,1	99,1	101,7	109,6
$\varepsilon_{L\%}$, %	1,86	1,88	1,41	0,74	2,38	1,68	2,75	1,45	1,72	2,76	2,99	2,06
$\varepsilon_{h\%ц}$, %	1,24	1,33	0,86	0,42	1,20	0,74	1,75	0,93	1,12	1,54	1,66	1,01
$\varepsilon_{h\%п}$, %	1,05	1,01	0,80	0,40	1,08	0,64	1,59	0,92	1,06	1,42	1,60	0,94
$R_{Lц}$	0,50	0,42	0,65	0,78	0,98	1,27	0,57	0,56	0,54	0,80	0,80	1,03
$R_{Lп}$	0,77	0,85	0,77	0,86	1,21	1,61	0,73	0,58	0,62	0,94	0,87	1,20

Из табл.2 видно, что приходится задавать различные значения $\varepsilon_{L\%}$, в том числе, чтобы обеспечить необходимую номинальную толщину полосы после правки. Коэффициент R_L при этом часто принимает значения меньше единицы, что в соответствии с формулой (8) говорит о преимущественном уменьшении толщины полосы по отношению к ширине.

На рисунке 14 отображена зависимость коэффициента пластической анизотропии R при правке от толщины полосы для центральной части и периферийной части.

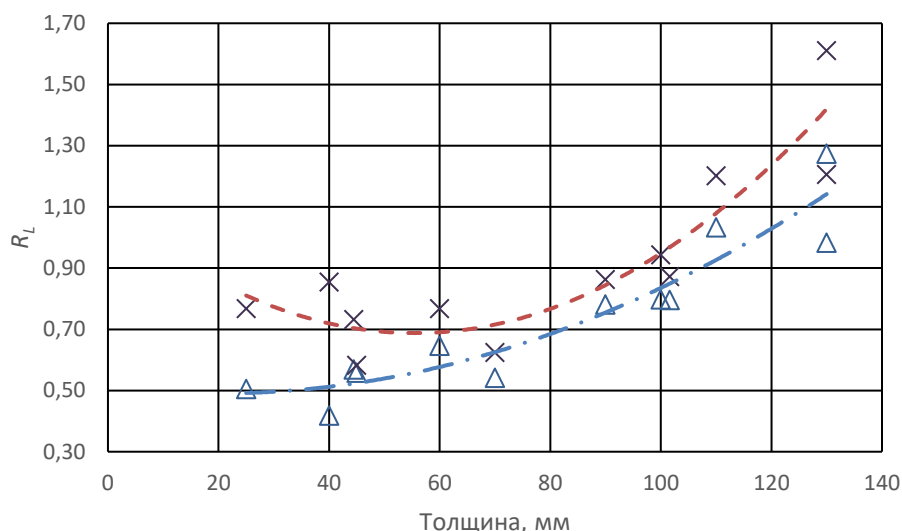


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента пластической анизотропии R_L при правке от толщины полосы для центральной части (метка Δ и линия регрессии штрихпунктирная) и периферийной части (метка $\times$ и линия регрессии штриховая) для общей выборки

Здесь видно, что коэффициент пластической анизотропии R_L принимает более высокие значения в периферийной части, чем в центральной. Кроме того, значения R_L выше 1 при толщинах полос более 100 мм и ниже 1 при толщинах полос менее 100 мм.

В статье [31] приведены результаты растяжения образцов из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si и показано, что коэффициент пластической анизотропии составляет величину около 0,8, по крайней мере он точно меньше единицы. Это соответствует полученным в опытах данным.

Объяснить эту ситуацию можно с позиций теории листовой прокатки алюминиевых сплавов. При горячей прокатке из-за высоких скоростей деформации рекристаллизация не проходит полностью, поэтому материал остается текстурированным, что создает определенный уровень анизотропии,

тем больший, чем больше степень деформации, то есть чем тоньше полоса [16].

В центральной части полосы коэффициент R_L в большей степени отклоняется от единицы, чем в периферийной части, что трудно объяснить наследием процесса прокатки, поскольку в этом процессе эти зоны находятся в равных условиях. Однако известно, что при самой правке напряжения от захватов или правильной, или испытательной машины распространяются за пределы контактной поверхности, что создает условия для изменения напряженно-деформированного состояния.

Отдельно выполнены расчеты с выделением групп сплавов. На рисунке 15, а, б отображены гистограммы для сплавов 5083 и АМг6, соответственно.

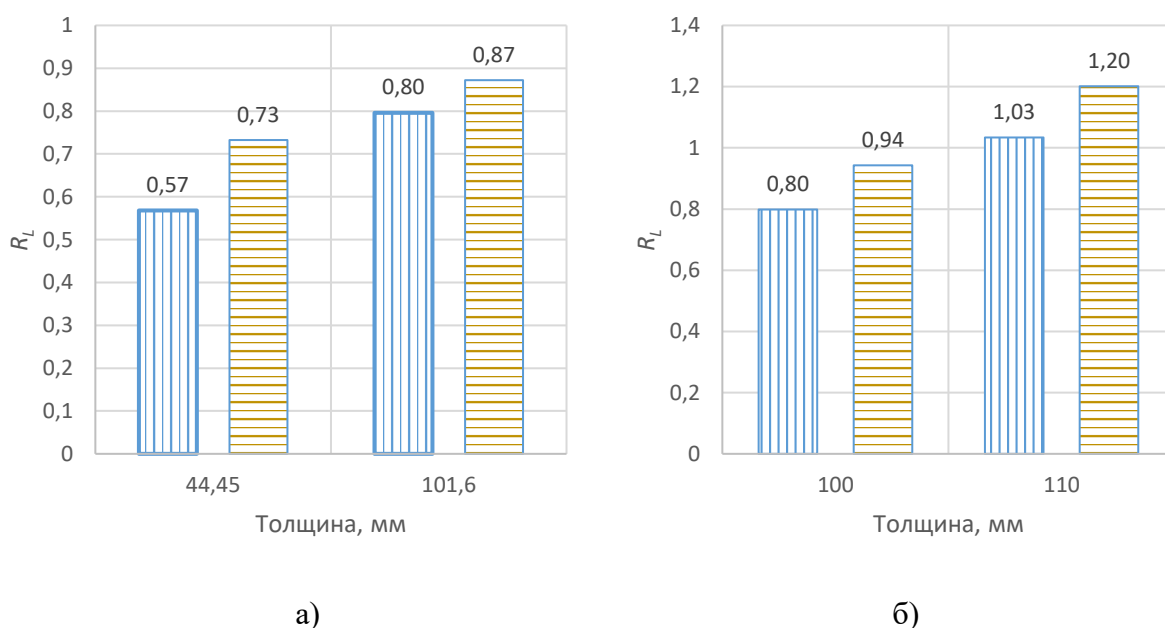


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента пластической анизотропии R_L при правке от толщины полосы для центральной части (вертикальная штриховка) и периферийной части (горизонтальная штриховка) для сплава 5083 (а) и АМг6 (б)

Здесь видна общая тенденция: при увеличении толщины коэффициент пластической анизотропии R_L повышается.

В ходе статистической обработки наряду со средними величинами определены также дисперсии толщин полос до и после правки, отображенные для полос из сплава Д16 на рисунке 16. Здесь видно, что в

интервале толщин 20...60 мм можно говорить о примерном равенстве дисперсий. Однако выше толщины 80 мм начинается рост показателя, при этом при толщине 130 мм дисперсия увеличивается примерно в четыре раза относительно дисперсии для малых толщин. Приведенные на графиках линии регрессии параболического типа описывают поведение экспериментальных точек при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0,987$ до правки и $R^2 = 0,967$ после правки, что говорит о достаточной степени корректности регрессионного анализа. Обнаруженное явление пока не имеет объяснений и требует дальнейшего изучения.

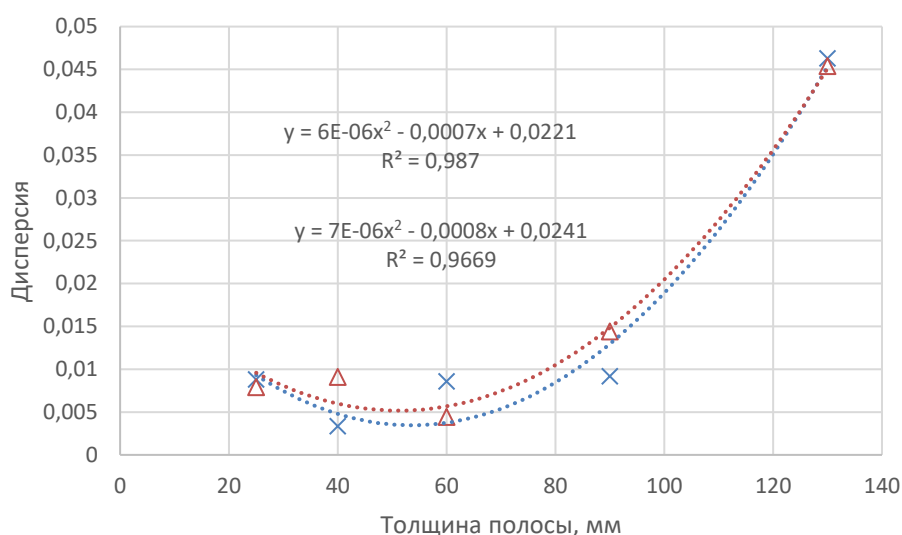


Рисунок 16 – Зависимость дисперсии толщины от номинальной толщины полосы до правки (x) и после правки (Δ) для полос из сплава Д16

Значимость полученных результатов подтверждается следующим примером. Полосу из сплава Д16 толщиной 25,1 мм подвергли правке с заданием в системе управления правильной машины относительного удлинения 2,00 %. Измерения после правки показали, что реальное относительное удлинение составило величину 1,86 %. Можно было ожидать, что при равном распределении деформаций между шириной и толщиной получим изменение толщины полосы после правки $25,1 * 1,86 / 100 / 2 = 0,23$ мм. Однако реальное изменение составило 0,28 мм, что составляет

ошибку прогноза 22 %. Можно показать, что при больших толщинах полос отклонение линейных размеров окажется еще выше. Это происходит потому, что не учитываются явления анизотропии.

Практическая значимость работы заключается в следующем. Задание параметров удлинения полосы при правке растяжением должно приводить к такому изменению толщины, которое должно обеспечить значение в поле допуска. При прокатке номинальную толщину обеспечивает зазор между валками. Но такого инструмента нет в операции правки растяжением. Поэтому нужно знать закономерности изменения толщины в операции правки, чтобы получать продукцию надлежащих размеров. В работе выявлено, что задание остаточного удлинения полосы для процесса правки приводит к неоднозначному утонению полосы, что связано с проявлениями анизотропии и что придется учитывать при назначении параметров правки.

3.3.4 Выводы из анализа распределения деформаций

Коэффициент пластической анизотропии принимает более высокие значения в периферийной части, чем в центральной. Значения коэффициента выше 1 при толщинах полос более 100 мм и ниже 1 при толщинах полос менее 100 мм. Для сплавов Д16, 5083 и АМг6, соответственно, прослеживается общая тенденция: при увеличении толщины коэффициент пластической анизотропии повышается. В ходе статистической обработки наряду со средними величинами определены также дисперсии толщин полос до и после правки. В интервале толщин 20...60 мм можно говорить о примерном равенстве дисперсий. Однако выше толщины 80 мм начинается рост показателя, при этом при толщине 130 мм дисперсия увеличивается примерно в четыре раза относительно дисперсии для малых толщин. В целом задание параметров удлинения полосы при правке растяжением должно приводить к такому изменению толщины, которое должно обеспечить значение в поле допуска. Показано, что изменение толщин полос зависит от их исходной толщины, полученной при прокатке. При больших толщинах на уровне 100...130 мм пластическое формоизменение приближается к условиям деформации изотропного материала. Для более тонких горячекатаных полос коэффициент пластической анизотропии изменяется в диапазоне 0,4...0,9, причем он тем больше, чем больше толщина полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены основные свойства и виды плоских полуфабрикатов из алюминия и алюминиевых сплавов. Рассмотрена технология производства плоских полуфабрикатов, технология и оборудование для проведения правки растяжением. Приведены новые патентные разработки в области прокатки плоских полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Приведен анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов.

Представлены результаты исследования неравномерности деформации в процессе правки растяжением листового проката из алюминиевых сплавов. Представлено решение задачи правки растяжением полос из алюминиевых сплавов методом конечных элементов в системе ABAQUS с целью определения уровня деформаций. Представлены результаты моделирования. Выполнены расчеты компонентов вектора перемещений и тензора деформаций и напряжений. Сделан вывод о влиянии начальной формы полосы на распределение деформаций и напряжений. Практическая значимость работы заключается в объяснении причин дефектности, возникающей в результате правки.

Особый интерес представляет изучение причин неоднородности пластической деформации при правке растяжением по длине и ширине полуфабриката, а также определение оптимальных режимов деформации для получения наиболее благоприятного соотношения механических свойств, остаточных напряжений и плоскостности.

По теме ВКР выполнен ряд промышленных экспериментов, связанных с определением неравномерности деформации и проявлению анизотропии при правке толстых листов и плит из алюминиевых сплавов. Получено большое количество данных, полезных для производства. Выполнена апробация исследований публикацией работ, входящих в систему РИНЦ и перечень ВАК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиева С.Г. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник / С.Г. Алиева [и др.]. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
2. Белецкий, В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник. Киев: «Коминтех», 2005. 365 с.
3. Беляев А.И. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник / А.И. Беляев [и др.]. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
4. Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справочное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 344 с.
5. Грудев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. М.: Издательство «Металлургия», 1994. 656 с.
6. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов / Б.А.Колачев, В.А.Ливанов, В.И.Елагин. М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
7. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов. М.: Металлургия, 1979. 264 с.
8. Колпашников А.И., Шор Э.Р. Производство листов из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1967. 319 с.
9. Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Технология прессования и листовой прокатки специальных сплавов в решениях задач. Екатеринбург: УПИ, 2004. 117 с.
10. Логинов Ю.Н., Котов В.В. Метод конечных элементов в описании напряженнодеформированного состояния процесса прессования: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 320 с.
11. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях их обработки давлением. М.: Металлургия, 1994. 288 с.

12. Полухин П.И. Прокатное производство. Учебник для вузов / П.И. Полухин [и др.]. – 3-е изд. – М.: Металлургия, 1982. 696 с.
13. Полухин П.И. Технология процессов обработки металлов давлением / П.И. Полухин [и др.]. – М.: Металлургия, 1988. 408 с.
14. Рудской А.И. Научные основы управления структурой и свойствами сталей в процессах термомеханической обработки. Монография. М.: РАН, 2019. 276 с.
15. Сидоров В.Н. Метод конечных элементов в расчёте сооружений. Теория, алгоритм, примеры расчётов в программном комплексе SIMULIA Abaqus: Учебное пособие / Сидоров В.Н., Вершинин В.В. - Москва: Издательство АСВ, 2015. – 288 с
16. Арышенский Е.В. Изучение особенностей эволюции текстуры при горячей прокатке в непрерывной группе авиационных алюминиевых сплавов. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17. № 3. С. 350-354.
17. Данилов С.В., Резник П.Л., Лобанов М.Л., Головнин М.А., Логинов Ю.Н. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2017. Т. 17. № 1. С. 73-80.
18. Добра Дж., Сава И., Гиура А. Оптимизация снятия напряжений при растяжении листов сплава 7175 для применений в авиации и космонавтике. Сборник докладов третьего международного конгресса «Цветные металлы и минералы». 2011. С. 554–559.
19. Колобнев Н.И., Сетюков О.А., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Влияние кристаллографических ориентировок на свойства плит из Al-Li сплавов В-1461 и 1424. Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 100-106.
20. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Влияние структуры прессованной полосы алюминиевого сплава 6061 на изменение ее

поперечных размеров при правке растяжением. Цветные металлы. 2002. № 7. С. 71–74.

21. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Влияние условий правки растяжением на точность размеров плоских полуфабрикатов. Теория и практика производства листового проката. Липецк: ЛГТУ, 2003. С. 42-47.

22. Логинов Ю.Н., Головнин М.А., Снегирев И.В. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni. Технология легких сплавов. 2017. № 1. С. 29-34.

23. Логинов Ю.Н., Соболев Д.О. Моделирование правки растяжением плиты из алюминиевого сплава. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением №5, 2019. – С. 41–44.

24. Ремнев К.С. Влияние анизотропии механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке растяжением. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. С. 8–12.

25. Соболев Д.О., Логинов Ю.Н. Мониторинг работы растяжной машины для правки полос из алюминиевых сплавов. В сборнике: Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV молодежной научно–практической конференции. 2019. – С. 106–108.

26. Соболев Д.О., Логинов Ю.Н. Неоднородность деформации при правке растяжением закаленной полосы из алюминиевого сплава 2024. В сборнике: МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛОФИЗИКА ЛЕГКИХ СПЛАВОВ: Сборник материалов и докладов IV международной школы для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». 2019. С. 46–49.

27. Cusset R., Azzouz F., Besson J., Dragon-Louiset M., Jacques V., Proudhon H. Modeling plasticity of an aluminum 2024T351 thick rolled plate for cold forming applications. International Journal of Solids and Structures. 2020. V. 202. P. 463-474.

28. Ha J., Fones J., Kinsey B.L., Korkolis Y.P. Plasticity and formability of annealed, commercially-pure aluminum: Experiments and modeling. *Materials*. 2020. 13(19), no 4285, P. 1-29.
29. Li Z.J., Winther G., Hansen N. Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum. *Materials Science and Engineering A*. 2004. P. 387-389. P. 199-202.
30. Lobanov M.L., Loginov Y.N., Danilov S.V., Golovin M.A., Karabanalov M.S. Effect of hot rolling rate on the structure and texture condition of plates of the Al – Si – Mg alloy system. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. V. 60, Iss. 5-6. P. 322-328.
31. Motoki Terano, Kazuhiko Kitamura, Masahiko Yoshino Masahiko Yoshino. Distribution of Plastic Anisotropy in Thickness Direction for Plate. *Procedia Engineering*. 2014. V. 81. P. 419-424.
32. Polmer I. *Light Alloys. Metallurgy of the Light Metals*. United Kingdom: Butterworth – Heinemann, 2017. 544 p. ISBN 978-0-08-099431-4.
33. Pujun Hao, Anrui He, Wenquan Sun. Formation mechanism and control methods of inhomogeneous deformation during hot rough rolling of aluminum alloy plate. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. V. 18, Iss. 1, P. 245-255.
34. Wen X.Y., Lee W.B. Orientation hardening and instability of an AA3003 aluminum alloy sheet under in-plane strain stretching. *Scripta Materialia*. 2000. 43(1). P. 1-7.
35. Wuyang Liu, Takashi Lizuka. Fundamental apparent plastic anisotropy of duplex embossed aluminum sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. V. 163. No 105125.
36. Zhu C.-C., Luo J.-Y. Stretch rate and deformation for pre-stretching aluminum alloy sheet. *Journal of Central South University of Technology*. 2012. V. 19(4). P. 875-881.

37. Xiaolian Zhao, Ling Chen, Kezhun Heb, Ni Wu, Jianmin Zeng. Effect of contact heat transfer on hot rolling of aluminum alloy. *Procedia Manufacturing*. 2019. V. 37. P. 91-96.
38. Xin-Wei She, Xian-Quan Jiang, Pu-Quan Wang, Bin-Bin Tang, Kang Chen, Yu-Jie Liu, Wei-Nan Cao. Relationship between microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy thick plate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020. V. 30, Iss. 7. P. 1780-1789.
39. Elibrary.ru: научн. электрон. библиотека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>, свободный (дата обращения: 01.11.2020).
40. Fips.ru: Федеральная служба по интеллектуальной собственности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 01.11.2020).
41. ScienceDirect (Elsevier), available at: <http://www.elsevier.com> (accessed: 01.11.2020).
42. ИОТ 403.00.0748 – 15 ОАО «КУМЗ» Для правильщика на машинах при работе на правильно–растяжной машине фирмы «SMS MEER».
43. ИЭ 500.00.0793 – 13 ОАО «КУМЗ» Правильно–растяжная машина фирмы «SMS MEER» цеха №21.
44. ТИ 303.00.0568 – 16 ОАО «КУМЗ» Правка плит растяжением на правильно–растяжной машине фирмы «SMS MEER».
45. Пат. 2363755 РФ. Способ получения листового проката из алюминиевых сплавов.
46. Пат. 2622195 РФ. Способ тонколистовой прокатки из алюминиевых сплавов.

Приложение. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Логинов Ю.Н., Соболев Д.О. Труды XII Конгресса прокатчиков. 2019. С. 199-201. Моделирование правки растяжением плиты из алюминиевого сплава. *Размещено в РИНЦ.*
2. Логинов Ю.Н., Соболев Д.О. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 5. С. 41-44. *Журнал из перечня ВАК РФ.*
3. Соболев Д.О., Логинов Ю.Н. Мониторинг работы растяжной машины для правки полос из алюминиевых сплавов. В книге: MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019. Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции. 2019. С. 102-103. *Размещено в РИНЦ.*
4. Направлена рукопись статьи в редакцию журнала ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ, входящего *в систему SCOPUS*, получена положительная рецензия: Соболев Д.О., Логинов Ю.Н. Анализ распределения деформаций при правке растяжением горячекатаных полос из алюминиевых сплавов.