

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



КОЖЕМЯКИНА АННА ЕВГЕНЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛЕНТ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ
ПРОКАТКЕ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук
Песин Александр Моисеевич

Магнитогорск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Применение алюминиевых сплавов, их международная классификация	14
1.2 Современное состояние холодной тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов.....	19
1.2.1 Традиционная прокатка алюминиевых сплавов	19
1.2.2 Общая характеристика процессов асимметричной листовой прокатки	20
1.2.3 Особенности прокатки с разницей скоростей.....	24
1.3 Постановка цели и задач исследования	34
ГЛАВА 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛИСТОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ.....	36
2.1 Адаптация программных комплексов к решению задачи асимметричной прокатки алюминиевой ленты	36
2.2 Компьютерное моделирование кинематики течения металла при асимметричной прокатке алюминиевого сплава	38
2.3 Компьютерное моделирование сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке алюминиевого сплава	47
2.4 Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния металла с учетом деформационного разогрева.....	51
2.5 Выводы по второй главе.....	56
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ И ТВЕРДОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛЕНТ НА ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННОМ СТАНЕ ДУО 400 АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ	57
3.1 Описание проведенных исследований.....	59

3.2 Исследование влияния отношения скоростей рабочих валков на усилие прокатки, технологическую пластичность и твердость алюминиевых лент	61
3.2.1 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава Д16	61
3.2.2 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава АМг6.....	65
3.2.3 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава АД33	67
3.2 Подтверждение адекватности компьютерного моделирования.....	70
3.3 Выводы по третьей главе	74
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	76
4.1 Способы повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке.....	78
4.1.1 Совершенствование технологической схемы прокатки алюминиевого сплава Д16	79
4.1.2 Совершенствование технологической схемы прокатки лент из алюминиевого сплава АМг6.....	84
4.1.2 Совершенствование технологической схемы прокатки лент из алюминиевого сплава АД33	87
4.2 Технологический способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при асимметричной прокатке с возрастающей пластичностью	91
4.3 Технологический способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки	93
4.4 Технологические способы регулирования твердости лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке	94
4.5 Выводы по четвертой главе.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104

ПРИЛОЖЕНИЕ А Заключение по результатам экспериментальных исследований получения алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технологический регламент асимметричной прокатки алюминиевых лент из сплава Д16, АМгб и АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В Уведомление о приеме и регистрации заявки на изобретение.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акт использования результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.....	135

ВВЕДЕНИЕ*

Актуальность темы исследования. Одной из ключевых целей развития отрасли цветной металлургии России в период 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года является обеспечение возрастающего спроса на цветные металлы и продукцию из них необходимых номенклатуры, качества и объемах поставок металлоемким отраслям, как на внутренний, так и на мировой рынок, а также повышения конкурентоспособности продукции, импортозамещения и обеспечения сырьем [1].

Алюминий является одним из основных конструкционных материалов в мире, уступающих по объемам производства и потребления только черным металлам. Сегодня РФ является вторым по величине производителем алюминия в мире (после Китая), и ведущим экспортером этого металла [1].

В настоящее время алюминий, главным образом, используется в таких отраслях как строительство – 32 %, товары народного потребления и упаковка – 25 %, электротехника – 23 %, машиностроение – 11 %, черная металлургия – 10 %. В соответствии с положениями Стратегии развития Объединенной авиастроительной, Объединенной судостроительной корпораций, Стратегии развития железнодорожного транспорта на период до 2030 года спрос на алюминиевую продукцию существенно возрастет. Увеличению спроса на алюминиевые полуфабрикаты также способствует развитие авиа- и судостроения, энергомашиностроения, автомобильного и железнодорожного транспорта, и прежде всего сектора машиностроения. [1].

Согласно приказу Минпромторга России № 2591 от 14.07.2021 г., алюминиевая лента является продукцией, входящей в План мероприятий по импортозамещению в отрасли цветной металлургии Российской Федерации с планируемой к 2024 году долей продукцией на отечественном рынке в 75 % [2].

Одним из важных требований к листовым алюминиевым сплавам является

* Работа выполнена при научном консультировании к.т.н. Пустовойтова Д.О.

технологическая пластичность или способность обрабатываться. Традиционно при прокатке металлов и сплавов происходит их упрочнение и соответственно снижение технологической пластичности [3]. При достижении определенного уровня деформации технологическая пластичность практически полностью теряется, дальнейшая деформация без применения дополнительных термообработок становится невозможной, что, в свою очередь, приводит к усложнению технологического процесса и снижению производительности, а также введению дополнительных ограничений технологического процесса.

Начиная с 2010-х гг., асимметричная прокатка рассматривается с позиции возможности получения требуемых свойств проката. В работах отечественных и зарубежных ученых [4-21] показано, что одним из наиболее перспективных способов получения требуемых свойств проката является процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основу которого составляет целенаправленно создаваемая асимметрия за счет разности окружных скоростей рабочих валков.

Однако вопросы повышения технологической пластичности изучены недостаточно, в связи с этим разработка способов повышения технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке, является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа представляет собой самостоятельное и логически завершенное научное исследование, отражающее решение актуальной задачи разработки способов повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке.

Цель исследования – повышение технологической пластичности алюминиевых лент за счет рассогласования скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке.

Достижение поставленной цели работы обеспечивается путем постановки и решения следующих задач:

- численного исследования напряженно-деформированного состояния, а

также силовых, кинематических и фрикционных параметров процесса асимметричной тонколистовой прокатки алюминиевых лент при отношении скоростей рабочих валков от $V_1/V_2 = 1,0/1,0$ до $V_1/V_2 = 10,0/2,0$;

– экспериментальной проверки и коррекции полученных результатов на новом уникальном лабораторно-промышленном стане 400 асимметричной прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в широком диапазоне отношений их скоростей от $V_1/V_2 = 1,0/1,0$ до $V_1/V_2 = 10,0/1,3$;

– разработки промышленно-применимых технологических схем повышения технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке.

Научная новизна работы:

1. На основе компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 2D/3D показано, что истинная деформация ϵ для алюминиевых лент достигает экстремальных значений при отношении скоростей рабочих валков равном $(0,76 \dots 0,96) \cdot h_0/h_1$, где h_0 и h_1 – входная и выходная толщины листа.

2. Впервые показано, что увеличение отношения скоростей рабочих валков с 1,0 до 6,7 позволяет:

– существенно снизить усилие прокатки по сравнению с симметричным случаем: в 1,9 раз (для сплава АД33), в 2,3 раза (для сплава АМг6), в 3,2 раза (для сплава Д16);

– увеличить технологическую пластичность (увеличить относительное обжатие без разрушения образцов) для Д16 с 48 до 89 %, для АМг6 с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %;

– повысить после асимметричной прокатки ленты из сплава Д16 относительное удлинение образцов до 12,3 % по сравнению с 6,2 % при отожжённом состоянии.

3. Впервые установлена возможность регулирования твердости различных лент из алюминиевых сплавов Д16 (от 67 до 122 НВ), АМг6 (от 102 до 132 НВ) и АД33 (от 99 до 121 НВ) в зависимости от технологических параметров прокатки (отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия).

Теоретическая и практическая значимость:

1. В работе развивается подход, разработанный на кафедре технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», по использованию асимметричной прокатки металлических лент. В частности, дополнительно к полученным ранее результатам показано, что увеличение отношения скоростей рабочих валков с 1,0 до 6,7 раз приводит к снижению усилия прокатки по сравнению с симметричным случаем в 1,9-3,2 раза, увеличению технологической пластичности для разных алюминиевых сплавов (для Д16 с 48 до 89 %, для АМгб с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %).

2. Выполнена постановка задачи компьютерного описания процесса асимметричного деформирования, отличающаяся формулированием граничных и начальных условий, а также принятием допущений процесса. По результатам компьютерного моделирования выявлено влияние основных параметров технологических процессов (обжатия, коэффициенты трения, отношения скоростей валков) асимметричной прокатки алюминиевых лент при отношении скоростей рабочих валков от 1 до 5 на напряженно-деформированное состояние алюминиевых сплавов.

3. Предложены новые технологические схемы производства алюминиевых лент с повышенной технологической пластичностью, позволяющие исключить от одной до трех прокаток и от одного до трех отжигов.

4. Предложен способ производства алюминиевых лент с возрастающей пластичностью, предполагающий сокращение трех прокаток и четырех отжигов.

5. Разработанные новые технические и технологические решения производства алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане дуо 400 приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Представленная совокупность технологических схем, позволяющих существенно повысить технологическую пластичность, а также технологический регламент асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМгб,

АД33 на стане дуо 400 внедрены в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева». Разработанные технические решения применены в образовательном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Методология и методы исследования. При разработке принципов повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке за основу были взяты положения теории пластичности для описания напряженно-деформированного состояния металла, а также теории обработки металлов давлением для расчетов параметров асимметричного деформирования.

Исследование напряженно-деформированного состояния металла осуществлялось на основе метода конечных элементов с использованием программного комплекса DEFORM 2D/3D. Проверка адекватности компьютерного моделирования производилась сопоставлением моделей, полученных с использованием программного комплекса и экспериментальных данных.

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторно-промышленном стане дуо 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов имени А.П. Жилыева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», получившем в 2022 году статус уникальной научной установки.

Основными методами исследования характеристик полученных алюминиевых лент явились испытания механических свойств.

На защиту автором выносятся:

1. Зависимости истинной деформации ϵ от отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия алюминиевых лент, отличающиеся достижением максимального значения истинной деформации при отношении скоростей рабочих валков равном $(0,76...0,96) \cdot h_0/h_1$, где h_0 и h_1 – входная и выходная толщины листа.
2. Зависимости усилия прокатки, технологической пластичности, твердости алюминиевых лент от увеличения отношения скоростей рабочих валков в широком диапазоне скоростей рабочих валков от 1,0 до 6,7.
3. Новые технологические схемы, позволяющие исключить от одной до трех

прокаток и от одного до трех отжигов за счет существенного повышения технологической пластичности.

4. Новый способ асимметричной прокатки с возрастающей пластичностью, отличающийся увеличением относительного удлинения образца до 12,3 % по сравнению с 6,2 % при отожжённом состоянии.

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций обеспечена применением специализированного инженерного комплекса DEFORM 2D/3D, предназначенного для математического моделирования методом конечных элементов технологических процессов обработки металлов давлением с учетом термомеханических процессов нагрева и охлаждения металла, в том числе, в процессе деформации, а также взаимодействия деформирующейся заготовки с технологическим инструментом и оборудованием; качественным и количественным совпадением полученных результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на лабораторно-промышленном стане асимметричной прокатки 400.

Апробация работы:

Основные положения диссертационного исследования были изложены и обсуждены на международных конференциях различных уровней: METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 2018, г. Брно, Чехия, 2018 г.; METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials 2019, г. Брно, Чехия, 2019 г.; METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials 2021, г. Брно, Чехия, 2021 г.; Современные достижения университетских научных школ, Россия, г. Магнитогорск, 2019 г.; 78-ая Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», г. Магнитогорск, Россия, 2020 г.; 80-ая Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», г. Магнитогорск, Россия, 2022 г.; V Международная молодежная научно-техническая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2020», Россия, г. Магнитогорск, 2020 г.; VI Международная

молодежная конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2022», Россия, г. Магнитогорск, 2022 г.; 27 Международная промышленная выставка «МЕТАЛЛ-ЭКСПО 2021», Россия, г. Москва, 2021 г.; Международный форум проектов программ союзного государства – X форум вузов инженерно-технологического профиля, Белоруссия, г. Минск, 2021 г.; V Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии», Россия, г. Челябинск, 2022 г.

На 27-ой Международной промышленной выставке «МЕТАЛЛ-ЭКСПО 2021» получен диплом лауреата конкурса «Молодые ученые».

В диссертации были использованы результаты, полученные в пяти научно-исследовательских работах:

– в рамках Мегагранта (проект «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений», договор № 074-02-2018-329 от 16 мая 2018 г.);

– в рамках Грантов Российского научного фонда (проекты «Разработка и теоретико-экспериментальное исследование новых методов интенсивной пластической деформации для получения металлических наноструктурированных листов повышенной прочности», соглашение №15-19-10030-П от 13 апреля 2018 г.; «Механика холодной пластической сварки слоистых композитов Al-Fe на основе микроструктурного дизайна межфазной границы раздела для обеспечения повышенной прочности соединения», соглашение 20-69-46042 от 20 мая 2020 г.; «Разработка легких наноструктурированных функционально-градиентных материалов для высокопрочных применений с помощью методов гибридной асимметричной прокатки и инкрементальной формовки», соглашение № 22-49-02041 от 9 марта 2022 г.);

– в рамках Гранта Российского Фонда Фундаментальных исследований на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре (проект «Разработка

технологии асимметричной прокатки как метода интенсивной пластической деформации алюминиевых лент с градиентной структурой, обладающих повышенной прочностью и пластичностью», договор № 20-38-90097/20 от 03 сентября 2020 г.).

Публикации. Диссертационное исследование отражено в 16 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 4 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science; 8 статьях, включенных в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов.

Граф диссертационного исследования приведен на рисунке 0.1.

Разработка способов повышения технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке

Цель работы: повышение технологической пластичности алюминиевых лент за счет рассогласования скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке



Рисунок 0.1 – Граф работы

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Алюминиевые сплавы активно применяются в различных отраслях промышленности, особенно это касается авиастроения, автомобилестроения и железнодорожного транспорта. Поэтому развитие новых более экономичных методов получения алюминиевого проката и усовершенствование уже существующих методов имеет большое значение.

Плоский алюминиевый прокат подразделяется на плиты, листы, ленты и фольгу [22-26]. В настоящей работе будут рассмотрены алюминиевые ленты.

Алюминиевые ленты изготавливают из алюминия марок: А7, А6, А5, А0, АД0, АД1, АД00, АД, ММ, Д12, АМц, АМцС, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, АВ, Д1, Д16, В95, 1915, В95-1, толщиной от 0,25 до 10,5 мм, шириной от 40 до 2000 мм в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 13726-97 [27].

В последнее годы в различных отраслях промышленности предъявляются повышенные требования к используемым методам обработки, в частности требуется сочетание повышенных физико-механических свойств и технологической пластичности, которое рассматривается, как возможность подвергаться деформированию без образования трещин.

Холоднокатаный алюминиевый прокат получают традиционной прокаткой и термической обработкой в определенном интервале температур с выдержкой до нескольких часов между проходами, что сказывается на длительности, трудоемкости и энергоемкости процесса.

В связи с этим, в последние годы активное развитие получил процесс асимметричной прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет отношения скоростей рабочих валков, разницы диаметра валков, условий трения [28].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что использование процесса прокатки с рассогласованием скоростей валков по

сравнению с симметричной прокаткой позволяет существенно снизить усилие прокатки и улучшить точность геометрических размеров и механические свойства [28-34].

1.1 Применение алюминиевых сплавов, их международная классификация

Необходимость удовлетворять постоянно растущие требования к металлопродукции, в том числе к методам их обработки, являются причинами усовершенствования технологий обработки металлов давлением [35-38].

Алюминий и его сплавы активно используются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности (рисунок 1.1) вследствие их малой плотности и высокой удельной прочности [39-44].

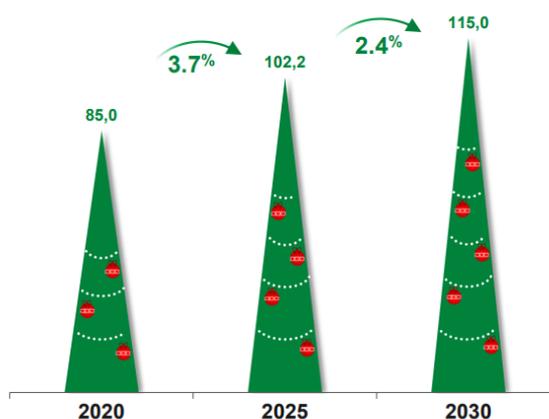


Рисунок 1.1 – Динамика потребления полуфабрикатов из алюминия [45]

В настоящее время сохраняется тенденция увеличения спроса на алюминиевый прокат для машиностроения, листовой прокат в строительстве, производства потребительских товаров, тары и упаковки.

Структура прироста спроса на полуфабрикаты из алюминия по отраслям конечного потребления представлена на рисунке 1.2.

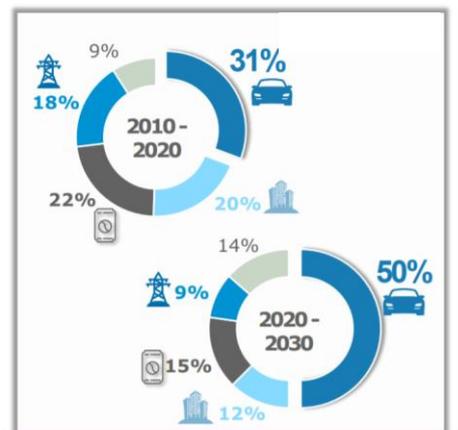


Рисунок 1.2 – Структура прироста спроса на полуфабрикаты по отраслям потребления [45]

В настоящее время наибольший объем потребления алюминиевого проката приходится на автостроение – более 26 % всего мирового использования. В 2014 году мировая автомобильная индустрия потребила 2,87 млн тонн алюминия. Алюминий позволяет создавать современный, энергоэффективный и безопасный транспорт за счет легкости, прочности и устойчивости к коррозии. Увеличение содержания алюминия в автомобилях будет происходить главным образом за счет кузовных деталей. Прогнозируется, что к 2025 году доля алюминия в одном автомобиле превысит 250 кг. Структура роста доли автопрома в структуре потребления алюминия представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Темпы роста спроса потребления алюминия в сегменте 2020-2030 годы [45]

В международной маркировке алюминия и его сплавов первая цифра обозначает группу основных легирующих элементов, по которым алюминиевые сплавы классифицируются по восьми сериям [39]:

- 1xxx серия – технически чистый алюминий с минимум 99 % содержанием алюминия;
- 2xxx серия (Cu) – сплавы, легирующим элементом которых является медь, дюралюмины, упрочняемые термической обработкой;
- 3xxx серия (Mn) – сплавы, легирующим элементом которых является марганец, неупрочняемые термической обработкой;
- 4xxx серия (Si) – литейные сплавы, легирующим элементом которых является кремний, известны как силумины;
- 5xxx серия (Mg) – сплавы, легирующим элементом которых является магний, неупрочняемые термической обработкой;
- 6xxx серия (Mg + Si) – сплавы, легирующим элементом которых является магний и кремний, самые пластичные, термоупрочняемые, обладают высокой прочностью;
- 7xxx серия (Zn) – сплавы, легирующим элементом которых является цинк, магний, термоупрочняемые, самые прочные из алюминиевых сплавов.
- 8xxx серия – сплавы, легирующим элементом которых являются элементы, не входящие в другие серии.

Учитывая вышеизложенное, в настоящем исследовании будут рассмотрены наиболее распространённые алюминиевые сплавы, широко применяемые в различных отраслях промышленности:

- сплав Д16 (2xxx серия), дуралюмин, самый распространенный алюминиевый сплав. Является конструкционным материалом для авиационного и транспортного машиностроения. В авиастроении сплав Д16 используется для изготовления несущих элементов фюзеляжей и крыльев, а также обшивки, в автомобильной промышленности для производства кузовов, в нефтяной промышленности применяется при изготовлении буровых труб;

– сплав АМгб (5xxx серия), сплав алюминия с магнием, называемый магналией, сочетает удовлетворительную прочность с высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Этот сплав применяется в обшивке автотранспорта, в изготовлении цистерн для перевозки нефтепродуктов и химически активных веществ. Прокат АМгб подходит для производства деталей и металлоконструкций многоцелевого применения;

– сплав АД33 (6xxx серия), сплав повышенной пластичности, по сравнению с дуралюминами менее легирован, уступающий по прочности, но являющийся более пластичными, что позволяет подвергать его штамповке, вытяжке, изготавливать из них изделия сложной формы, в том числе полые профили. Сплав применяется в автомобилестроении, в том числе для изготовления корпусов грузовых автомобилей, пассажирских вагонов, а также для изготовления деталей рам, направляющих сидений, бамперов, конструкционных деталей, обладающих повышенной прочностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью.

Химический состав выбранных алюминиевых сплавов в соответствии с требованиями ГОСТ 4784-2019 приведен в таблице 1.1 [46].

Таблица 1.1 – Химический состав алюминиевых сплавов (содержание элементов максимальное, если не указаны пределы)

Обозначение марки	Массовая доля элемента, %													
	Буквенное	Кремний	Железо	Медь	Марганец	Магний	Хром	Цинк	Титан	Никель	Дополнительные указания	Прочие элементы		Алюминий
												каждый	сумма	
Д16	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10	0,25	0,15	-	Титан+цирконий: 0,20	0,05	0,15	Остальное	
АМгб	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	0,2	0,02-0,10	-	Бериллий: 0,0002-0,005	0,05	0,1	Остальное	
АД33	0,4-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	-	-	0,05	0,15	Остальное	

Ленты изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 13726-97 из алюминия марок Д16, АМг6 с химическим составом по ГОСТ 4784-2019. В зависимости от марки сплава и состояния материала изготавливают размеров, указанных в таблице 1.2 [27].

Таблица 1.2 – Размеры лент из алюминия и алюминиевых сплавов

Состояние материала	Марка алюминия или алюминиевого сплава и плакировка	Толщина лент, мм	Ширина лент, мм
Без термической обработки	А7, А6, А5, А0, АД0, АД1, АД00, АД, АМц, АМцС, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, АМг6Б, АВ, Д1, Д1А, Д16, Д16А, В95-1, В95-1А	От 5,0 до 10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000
	1915		1200, 1500, 2000
	В95А		1000, 1200, 1400, 1500, 2000
Отожженное	А7, А6, А5, А0, АД0, АД1, АД00, АД, АМц, АМцС, АМг2, АМг3	От 0,25 до 2,0	От 40 до 500, 600, 700, 800, 900, 1000
		Св. 2,0 до 3,0	700, 800, 900, 1000
	А7, А6, А5, А0, АД0, АД1, АД00, АД, АМц, АМцС, АМг2, АВ	От 0,3 до 0,4	1000
		Св. 0,4 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600
		Св. 0,7 до 10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000
	Д1, Д16, Д1А, Д16Б, Д16А	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600
		Св. 0,7 до 10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000
	АМг3, АМг5, АМг6Б, АМг6	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600
		Св. 0,7 до 10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000

1.2 Современное состояние холодной тонколистовой прокатки алюминиевых сплавов

1.2.1 Традиционная прокатка алюминиевых сплавов

В ходе холодной прокатки возникает деформационное упрочнение листового проката, что сказывается на понижении пластичности и делает невозможной дальнейшую прокатку особенно высоколегированных листов. Для устранения этого явления листовой прокат обычно подвергают термической обработке между проходами в определенном интервале температур. Чем меньше толщина листового проката, тем большее число отжигов необходимо. Отжиги холоднокатаного листа создают новую микроструктуру и мягкое состояние материала, пригодное для последующего процесса деформирования [47]. При этом необходимо соблюдать медленный нагрев до температуры отжига и последующее медленное охлаждение. Очевидными недостатками этого способа являются высокая трудоемкость и энергоемкость процесса.

Получение проката требуемой толщины может достигаться холодной прокаткой до нагартованного состояния и кратковременной поверхностной обработкой с помощью облучения пучком ионов с атомной массой $A \geq 10$ а.е.м., энергией 20-40 кэВ, плотностью ионного тока 0,1-1 мА/см² в течение 5-200 с. [47].

Дополнительные технологические стадии прокатки алюминиевых сплавов приводят к усложнению технологического процесса и снижению производительности.

Так способ холодной прокатки алюминиево-магниевых сплавов в несколько проходов со степенью деформации за проход 40-45 %, предполагает дополнительное охлаждение металла до 70-80 °С между проходами, с целью устранения нагрева, возникающего при прокатке [48].

Прокатка с целью повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов, подразумевающая гомогенизацию литого сплава при температуре выше 560 °С, сочетание горячей и холодной прокатки, отжиг холоднокатаной полосы в

две стадии [49], характеризуется длительностью процессов термообработки и необходимостью деформирования с большими степенями обжатия при низких температурах.

Способ прокатки со степенью деформации 80-90 % при комнатной температуре, предполагающий сильный наклеп и последующий нагрев до температуры выше 400 °С, отличается большими усилиями прокатки, а, следовательно, приводит к сильному растрескиванию сплава и снижению выхода годного из-за необходимости обрезки растрескавшегося металла. Кроме того, высокие усилия деформирования приводят к необходимости создания мощного оборудования [49].

Усложнению процесса прокатки способствует введение дополнительных ограничений осуществления процесса.

Так в способе получения алюминиево-магниевого проката, предполагающем холодную прокатку с суммарной степенью деформации 75-95 % и промежуточный рекристаллизационный отжиг, вводится ограничение по степени деформации после отжига. Степень деформации до отжига составляет 1-1,25 от степени деформации после отжига [50].

Таким образом, рассмотренные способы получения алюминиевого проката с помощью традиционной симметричной прокатки предполагают дополнительные технологические циклы прокатки-отжига, приводящие к усложнению технологического процесса и снижению производительности, а также введение дополнительных ограничений технологического процесса.

1.2.2 Общая характеристика процессов асимметричной листовой прокатки

К понятию асимметричная прокатка приводит анализ распределений различных величин – геометрических, кинематических, силовых и других – в очаге деформации. Рассматривая распределение геометрических, кинематических,

энергосиловых параметров в очаге деформации, авторы работы [4] разделяют асимметрию относительно одной плоскости – горизонтальную (по ширине очага относительно вертикальной плоскости) или вертикальную (по высоте очага относительно горизонтальной плоскости), а также асимметрию относительно двух плоскостей горизонтальной и вертикальной. При простом процессе прокатки асимметрия обоих видов возникает из-за разнообразных возмущающих воздействий. Известны разнообразные способы классификации случаев асимметричной прокатки с использованием различных признаков.

Поскольку прокатка является сложным техническим процессом, сопровождающимся возмущениями, она всегда асимметрична, а случай симметрии – это идеализация реальных условий.

В настоящей работе горизонтальная асимметрия, а также асимметрия относительно двух плоскостей горизонтальной и вертикальной рассматриваться не будут.

Асимметричная прокатка в вертикальной плоскости может быть создана: разницей в температурах, когда один валок намеренно нагрели, оставив другой холодным [51]; различными диаметрами рабочих валков при вращении с одинаковой окружной скоростью [12]; разницей в трении [52, 53]; приводным и одним неподвижным валком/элементом [54, 55]; различными окружными скоростями валков, при этом только один валок остается рабочим [56]; различными окружными скоростями рабочих валков одного диаметра.

С промышленной точки зрения, прокатка с различными скоростями рабочих валков одинаковых диаметров (оба валка приводные) – наиболее подходящий способ внедрения асимметричной прокатки [35-38]. Для данного процесса, степень асимметрии определяется отношением окружных скоростей V_1 и V_2 (V_1/V_2) рабочих валков.

Первое упоминание асимметричной прокатки было сделано Разуваевым в СССР в 1940 г. [57]. Он предложил процесс прокатки со скоростной асимметрией при отношении окружных скоростей валков.

Первое теоретическое описание процесса асимметричной прокатки было сделано Е. Зибелем, Г. Заксом и Л. Клингером, Е. Гофманом [58].

Среди отечественных авторов, развивающих процессы асимметричной прокатки, можно выделить А.И. Целикова [59, 60], А.А. Королева [61], А.И. Гришкова [60].

В 50-ых – 60-ых годах прошлого столетия были проведены первые лабораторные и промышленные эксперименты по асимметричной прокатке [62, 63]. В 70-ые – 90-ые годы прошлого столетия исследование процессов асимметричной прокатки было в основном направлено на улучшение геометрии листа и снижение усилий деформирования при холодной и горячей прокатке [5, 64-70]. При этом степень асимметрии как правило была меньше.

Челябинской школой прокатчиков были созданы принципиально новые процессы прокатки-волочения, частичной прокатки-волочения, сдвоенной прокатки-волочения, процессы в режиме заданных скоростей рабочих валков и др., разработаны теории этих процессов (В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев, В.Г. Шеркунов, Н.В. Судаков, В.Г. Сосюрко, В.И. Крайнов, В.Я. Тумаркин, А.П. Пелленен, А.В. Выдрин и др.) [5, 71-75]. Развита теория асимметричных процессов для сортовой прокатки (В.Н. Выдрин, В.Г. Дукмасов) [5, 76].

Краматорская школа (В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин и др.) усовершенствовали процесс прокатки между неподвижным и приводным валками, впервые предложенный В.Н. Выдриным и Л.М. Агеевым. Создана теория этих процессов и разработан комплекс математических моделей процесса прокатки в режиме заданной величины опережения [5, 77-80].

Московские учеными (В.П. Полухин, А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, А.И. Трайно, Н.И. Ефремов и др.) была развита теория вертикально-асимметричной прокатки и предложены новые технические решения [5, 81-86].

Большой интерес представляют также исследования В.Г. Синицына, Г.Л. Химича, М.Я. Бровмана, В.С. Горелика, В.В. Смирнова, В.А. Николаева, А.П. Грудева и др. [5].

Благодаря работам А.И. Целикова, А.А. Королева, В.Н. Выдрина, Г.Л. Химича, В.П. Полухина, А.Н. Гришкова, М.Я. Бровмана, В.Г. Синицина и других ученых создана современная научная теория, которая, пройдя опытную проверку, послужила основой для внедрения процессов асимметричной прокатки в промышленное производство [5, 87-101].

Учеными из г. Магнитогорска (В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов и др.) было установлено, что главной особенностью вертикально асимметричной прокатки является поворот очага деформации под действием крутящего момента, создаваемого противоположно направленными силами трения на верхней и нижней контактных поверхностях валков в смешанной зоне очага деформации. Получены распределения нормальных и касательных напряжений по длине дуг контакта в вертикально асимметричном очаге деформации как для общего, так и для важных частных случаев прокатки. Показана возможность и целесообразность отказа от цилиндрической поверхности неподвижного деформирующего элемента. Разработаны и внедрены в производство новые совмещенные процессы асимметричной прокатки и пластической гибки, а также прокатки и штамповки, позволяющие производить детали крупногабаритных агрегатов в линии толстолиствого прокатного стана [5, 102-106].

С 1990 годов получил развитие новый подход в исследовании процессов асимметричной прокатки, уделяющий внимание текстуре, измельчению зерна и механическим свойствам металла. Значительный вклад в развитие асимметричной прокатки внесли зарубежные исследователи. В работах корейских авторов [107] асимметричная прокатка используется для контроля текстуры и механических свойств сплавов алюминия. Работа [108] отражает измельчение зерен при асимметричной прокатке. В 2007 году процесс асимметричной прокатки с высокой разностью скоростей рабочих валков ($V_1/V_2=3$) был отнесен к методам интенсивной пластической деформации [12]. Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния значительного рассогласования скоростей валков ($V_1/V_2=4$) на структуру и свойства металлов и сплавов [77, 109, 110].

1.2.3 Особенности прокатки с разницей скоростей

Как было сказано ранее с промышленной точки зрения, прокатка с различными скоростями рабочих валков одинаковых диаметров (оба валка приводные) – наиболее подходящий способ внедрения асимметричной прокатки [35-38].

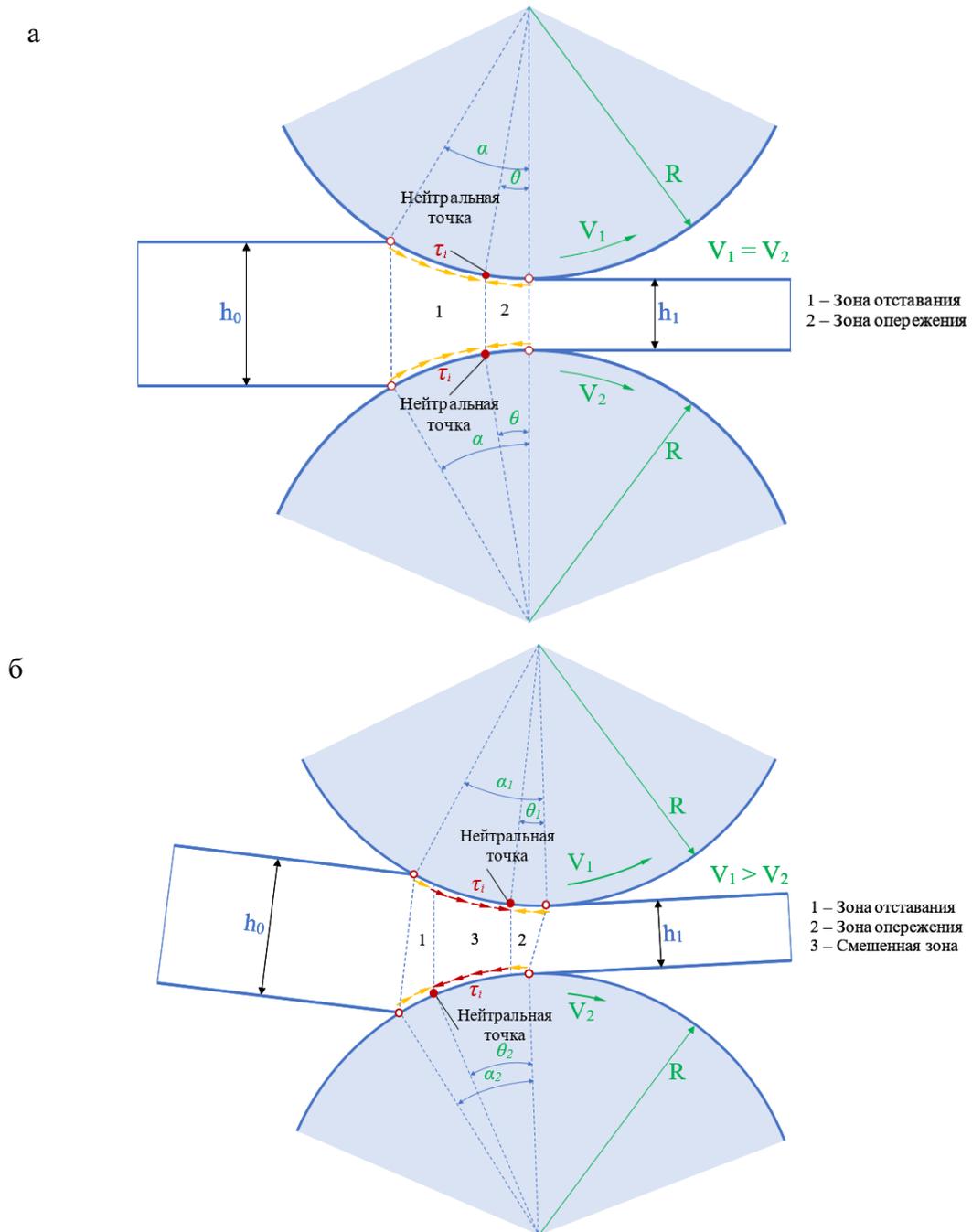
Асимметрия в вертикальной плоскости способствует изменению кинематики течения металла в очаге деформации. В частности, существенным образом меняются протяженности зон отставания и опережения со стороны верхнего и нижнего рабочих валков. В соответствии с этим явлением различают следующие случаи асимметричной прокатки (рисунок 1.4) [38]:

1) общий случай, предполагающий две кинематические зоны – отставания и опережения в очаге деформации, но протяженности этих зон со стороны верхнего и нижнего рабочих валков не одинаковы;

2) полупредельный случай, подразумевающий две зоны – отставания и опережения на одном валке, и только одну зону – отставания или опережения на другом валке;

3) предельный случай, при котором зона отставания реализуется только на одном валке, а зона опережения – на другом валке.

В зоне отставания силы контактного трения являются активными, а в зоне опережения – реактивными. Асимметрия кинематических зон со стороны верхнего и нижнего валков приводит к формированию так называемой смешанной зоны, в которой силы контактного трения являются противоположно направленными. С одной стороны, это приводит к снижению отрицательного («подпирающего») влияния контактных сил трения и, как следствие, возможности увеличения деформаций сжатия при прокатке, с другой стороны, в очаге создаются дополнительные сдвиговые деформации.



а – симметричная прокатка; б – асимметричная прокатка в общем случае

Рисунок 1.4 – Схема зоны деформации [38]

В настоящее время на основании исследований установлено, что появление отношения скоростей рабочих валков влечет за собой снижение подпирющего воздействия сил контактного трения и, как следствие, уменьшение деформирующих сил, а также интенсивности их изменения при изменении

исходных технологических параметров. Указанные преимущества определяют возможность повышения точности геометрических размеров полос, улучшения качества их поверхности [111].

Для общего случая процесса прокатки эквивалентная деформация включает в себя две составляющие: деформацию сжатия и сдвига. При симметричной прокатке деформации сдвига крайне малы, наклона вертикальных сечений не происходит. В свою очередь, в асимметричном очаге деформации в смешанной зоне, в которой на одном валке реализуется отстаивание, а на другом валке – опережение, деформации сдвига существенно возрастают [111].

На рисунке 1.5 схематически показано изменение геометрии элементарной ячейки при асимметричной тонколистовой прокатке.



Рисунок 1.5 – Элементарная ячейка до и после асимметричной прокатки [111]

Квадрат ABCD принимает форму параллелограмма A'B'C'D'. Высота квадрата уменьшается в направлении оси y, а длина увеличивается в направлении оси x. При этом изначально прямой угол уменьшается на величину угла сдвига φ.

Если рассмотреть элементарную квадратную ячейку, то чистый сдвиг характеризуется преобразованием квадрата ABCD в прямоугольник A'B'C'D', круга – в эллипс (рисунок 1.6). При этом деформация является монотонной, т.к. происходит равномерное укорочение ячейки вдоль одной оси – “bd” и равномерное ее удлинение вдоль другой – “ac”, перпендикулярной к первой. Оси эллипса в этом случае практически не изменяют своего положения в пространстве, заготовка вытягивается в направлении, совпадающем с большим диаметром эллипса. Чистый

сдвиг при этом характеризуется углом сдвига φ , который связан с трансформацией квадрата $abcd$ в ромб $a'b'c'd'$ (рисунок 1.6).

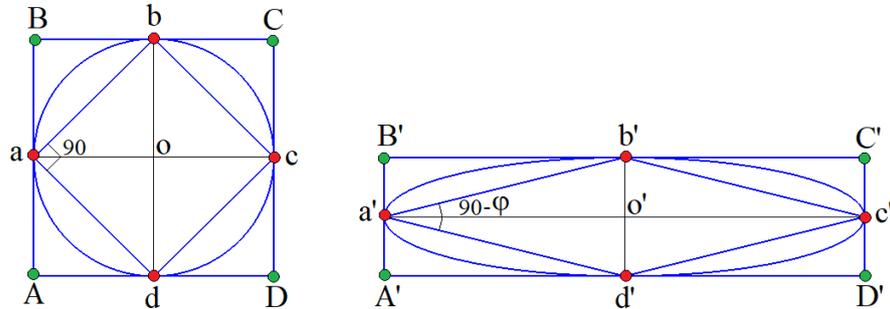


Рисунок 1.6 – Схема чистого сдвига [112]

Смещением всех точек тела параллельно одной оси характеризуется простой сдвиг [113, 114]. При этом квадрат $ABCD$ преобразуется в параллелограмм $A'B'C'D'$, основание и высота которого такие же, как и у исходного квадрата (рисунок 1.7). При простом сдвиге круг также превращается в эллипс, при этом, направление его осей при этом непрерывно меняется, т.е. происходит их поворот, а деформация является немонотонной. Сдвиговая деформация характеризуется углом сдвига φ .

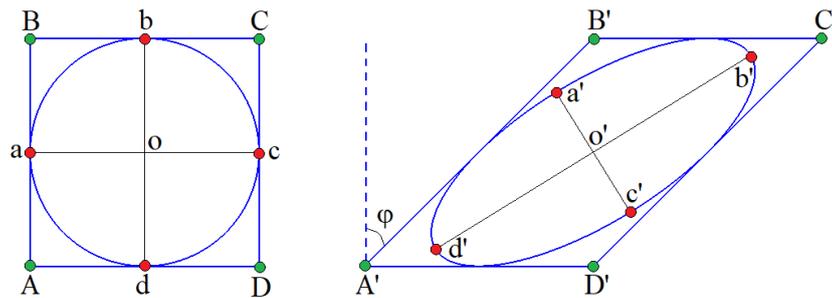


Рисунок 1.7 – Схема простого сдвига [112]

Особенностью процесса асимметричной листовой прокатки является возможность совмещения больших деформаций сжатия и сдвига. Другими словами, при асимметричной прокатке может быть реализована схема совмещенного простого и чистого сдвига (рисунок 1.8). Согласно этой схеме, квадрат $ABCD$ трансформируется в параллелограмм $A'B'C'D'$, основание которого

вытягивается, а высота укорачивается. При этом круг трансформируется в эллипс, направление осей которого непрерывно меняется, т.е. происходит их поворот, а деформация является немонотонной. Сдвиговая деформация также характеризуется углом сдвига φ .

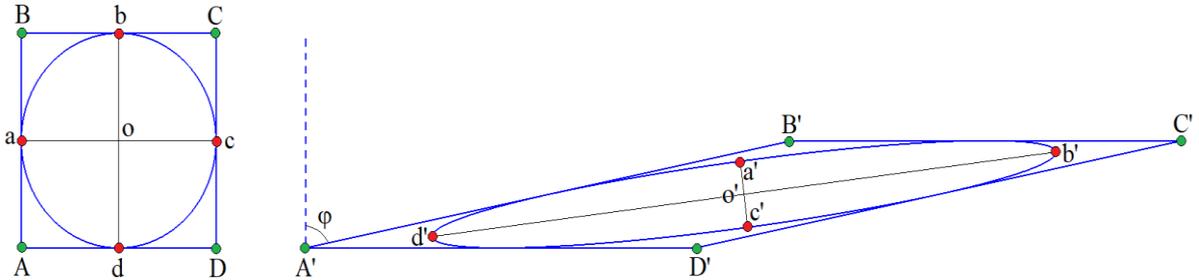


Рисунок 1.8 – Схема совмещенного простого и чистого сдвига [112]

Данная схема реализуется при асимметричной тонколистовой, аккумуляющей, криогенной прокатке.

Для расчета эквивалентной деформации металла при асимметричной прокатке воспользуемся следующей формулой (1.1) [112]:

$$e = \sqrt{\frac{2}{3} e_{ij} e_{ij}}, \quad (1.1)$$

$$e = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)]},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

С учетом того, что металл течет в сторону наименьшего сопротивления, получаем формулу (1.2):

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_x, \varepsilon_{22} = \varepsilon_y, \varepsilon_{33} = \varepsilon_z, \varepsilon_{12} = \frac{\gamma_{xy}}{2}, \varepsilon_{23} = \frac{\gamma_{yz}}{2}, \varepsilon_{31} = \frac{\gamma_{zx}}{2}, \quad (1.2)$$

Следовательно, формула (1.1) может быть представлена в следующем виде (формула (1.3)):

$$e = \sqrt{\frac{2}{9} \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6 \left(\frac{\gamma_{xy}^2}{4} + \frac{\gamma_{yz}^2}{4} + \frac{\gamma_{zx}^2}{4} \right) \right]}, \quad (1.3)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – линейные деформации растяжения и сжатия по соответствующим осям;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – сдвиговые деформации в соответствующих плоскостях.

Поскольку процессу тонколистовой асимметричной прокатки соответствует плоско-деформированное состояние металла, то можно записать формулу (1.4):

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y, \quad \varepsilon_z = 0, \quad \gamma_{yz} = 0, \quad \gamma_{zx} = 0, \quad (1.4)$$

Тогда после подстановки формулы (1.4) в формулу (1.3) получим формулу (1.5):

$$e = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\varepsilon_y^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad (1.5)$$

С учетом вышесказанного, а также используя рисунок 1.3, компоненты деформации ε_y и γ_{xy} можно рассчитать по формуле (1.6):

$$\varepsilon_y = \ln \frac{AB}{A'B' \cos \varphi}, \quad \gamma_{xy} = tg \varphi, \quad (1.6)$$

где φ – угол сдвига.

Если принять, что $AB = h_0$ и $A'B' \cos \varphi = h_1$, то окончательно формулу для расчета эквивалентной деформации при асимметричной тонколистовой прокатке запишем в следующем виде (формула (1.7)):

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + \frac{tg^2 \varphi}{4}}, \quad (1.7)$$

где h_0, h_1 – начальная и конечная толщина листа, соответственно;

φ – угол сдвига.

Особенностью процесса асимметричной листовой прокатки является возможность совмещения больших деформаций сжатия и сдвига. Другими словами, при асимметричной прокатке реализуется схема совмещенного простого и чистого сдвига, оказывающая влияние на способность металлов и сплавов подвергаться деформированию.

Как известно, с ростом степени деформации возрастают показатели прочности (предел текучести, предел прочности, твёрдость) и снижаются показатели пластичности (относительное удлинение).

Традиционно считается, что проявлением асимметричной прокатки, относящейся к холодной обработке металла давлением, является возрастание прочности и, соответственно, твердости обрабатываемого металла, закономерно связанное с возрастанием интенсивности пластической деформации [115].

Потеря ресурса пластичности, в результате многократной деформации, является существенным недостатком известных способов прокатки металлов и сплавов. Для обеспечения возможности дальнейшей деформации металла до требуемых размеров требуется проведение дополнительной термической обработки в виде отжига с целью восстановления пластичности, что связано с экономическими и временными ресурсами.

Исследование [116] описывает холодную асимметричную прокатку листа из технического алюминия марки АА1060 (чистота 99,6%) толщиной 12 мм до конечной толщины 5 мм в два прохода и затем отжиг при 673 К в течение 25 мин. Эксперименты по прокатке проводились на прокатном стане с диаметром валков 100 мм при комнатной температуре и без применения каких-либо смазок. Отношение скоростей рабочих валков регулировалось от 0,85 до 1,15.

Введение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 1,36 предполагает прокатку алюминиевого сплава начальной толщиной 3 мм до конечной толщины 0,3 мм за четыре прохода с относительным обжатием 25, 50, 66 и 90 %, что соответствует уменьшению толщины образца с 3 мм до 2,25, 1,5, 1 и 0,3 мм соответственно. Отжиг осуществляли после каждого прохода при

температуре 195 °С и в течение 30, 60, 90 и 120 минут соответственно. При этом суммарное обжатие составило 90 % [117].

Известен способ асимметричной прокатки с целью повышения прочностных свойств металла одновременно как по длине, так и по ширине листа за счет рассогласования окружных скоростей по меньшей мере в два раза и с единичной степенью деформации не менее 50 % до суммарной степени деформации 75-95 %. Прокатку осуществляют за два или четыре прохода, причем в каждом проходе, начиная с первого, задают одинаковое рассогласование окружных скоростей валков и одинаковую единичную степень деформации металла, а между проходами осуществляют поворот листа в плоскости прокатки на угол 90° [118].

Асимметричная прокатка с отношением скоростей рабочих валков равным двум позволяет повысить прочностные свойства металла, однако его пластические свойства при этом остаются низкими [119].

Асимметричной прокатке с целью получения ультрамелкозернистых и наноструктур, приводящих к повышению прочностных характеристик, в длинномерном прокате посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [6, 7, 13-15, 120-125]. Было показано, что использование асимметричной прокатки с целью получения ультрамелкозернистой структуры тонкой ленты является возможным. Например, в исследовании [124] доказана возможность использования асимметричной прокатки для производства алюминия с ультрамелкозернистой структурой размером 500 нм.

В работе [126] показана возможность получения ультрамелкозернистого чистого алюминия со средним размером зерна 1 мкм при асимметричной холодной прокатке. Листы были прокатаны с суммарным обжатием 90 % от 4 мм до 0,4 мм после 22 проходов. После асимметричной прокатки, предел текучести алюминия увеличился до 250 МПа, но относительное удлинение после разрыва уменьшилось до 4 % [126].

Известные работы по асимметричной прокатке образцов алюминиевых сплавов характеризуются небольшим отношением скоростей рабочих валков

$(V_1/V_2 \leq 2)$.

Работы китайских ученых описывают асимметричную холодную прокатку горячекатанных листов толщиной 8 мм до конечной толщины 2 мм с отношением скоростей рабочих валков 1,3 с уменьшением толщины на 0,6 мм при одном проходе, общее количество проходов составляет десять, суммарное относительное обжатие 75 % [127, 128].

Асимметричная прокатка с отношением скоростей рабочих валков 1,36 позволяет прокатывать образцы алюминиевых сплавов начальной толщиной 8 мм до толщины 0,65 мм без смазки, для достижения больших сдвиговых деформаций. Суммарное относительное обжатие составляет 92 % за четыре прохода. Перед прокаткой образцы подвергались отжигу при 350 °С в течение 1 ч [129].

Ведение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 1,5 позволяет прокатывать образцы алюминиевых сплавов начальной толщиной 2,92 мм до 0,3 мм за четыре прохода по схеме 2,92-2,13-1,42-0,99-0,3 мм, при этом суммарное относительное обжатие составило 90 %. Чтобы увеличить трение между валками и листом, прокатка производилась без смазки. После асимметричной прокатки образцы отжигали в течение 1 ч при 400 °С [130].

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2,0 при прокатке алюминиевых сплавов способствует снижению усилия прокатки, созданию большой сдвиговой деформации за счет изменения положения нейтральных точек в очаге деформации [131].

Работы по асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков до 4 ($V_1/V_2 \leq 4$) характеризуется относительной степенью обжатия не более 75 %.

Исследование асимметричной прокатки чистого алюминия с начальной толщиной заготовки 8 мм при отношении скоростей рабочих валков, равным 3,0 ($V_1/V_2 = 15/5$), подразумевает предварительный нагрев при температуре 400 °С в течение 1 часа, естественное охлаждение на воздухе, асимметричную прокатку,

при небольшом относительном обжатии за проход (15 %) [132]. Суммарное обжатие составляет 62,5 % за шесть проходов.

В работе европейских и корейских ученых образцы алюминиевого сплава АА-5182 асимметрично прокатывались с отношением скоростей рабочих валков, равным 3 с суммарной степенью относительного обжатия 50 % за два прохода. Таким образом, толщина образцов была уменьшена с 1,2 мм до 0,6 мм [133].

В работе [134] образцы алюминиевого сплава 5052 начальной толщиной 4 мм асимметрично прокатывались в валках диаметром 220 мм с отношением скоростей рабочих валков от 1 до 4 за четыре прохода, при этом относительное обжатие за проход составляло 25 %.

Асимметрия за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 4, где скорость нижнего валка составляла 5 м/мин, позволяет прокатывать образцы алюминиевых сплавов с относительным обжатием за проход, равным 30 %. При этом суммарное относительное обжатие составило 75 % за четыре прохода. Перед прокаткой образцы подвергались отжигу при 823 К в течение 3 ч с последующим воздушным охлаждением [135].

Исследования асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков, равным 4, предполагают суммарное относительное обжатие 50 % за два прохода. Верхний и нижний валки имели одинаковый диаметр 161,5 мм. Прокатка осуществлялась со смазкой, для ограничения трения между валками и листом (коэффициент трения примерно составлял 0,06) [136].

Рассмотренные работы по асимметричной прокатке алюминиевых сплавов с отношением скоростей рабочих валков от 1,5 до 4,0 позволяют достичь суммарное относительное обжатие 75 % за 2-10 проходов [127, 128, 132-136]. Известные работы по асимметричной прокатке с суммарным относительным обжатием образцов алюминиевых сплавов от 90 до 92 % подразумевают асимметричную прокатку за 4-22 прохода при небольшом отношении скоростей рабочих валков от 1,36 до 1,5 [126, 129, 130].

Асимметричная прокатка обладает большим потенциалом для крупномасштабного изготовления металлических деталей с улучшенными механическими свойствами. Высокая деформация сдвига приводит к обширной структурной эволюции, включающей измельчение зерен, влияющей на кристаллографическую текстуру. Очень важно, что результирующие механические свойства материалов намного лучше, чем у симметрично прокатанных материалов, при этом обладая неоспоримым преимуществом в виде лучшей эффективности с точки зрения меньшего количества необходимых операций [137, 138].

Асимметричный процесс прокатки получает с каждым годом все большее распространение и развитие. Процесс асимметричной прокатки рассматривается с позиции получения требуемой структуры и механических свойств. Однако, рассмотренные исследования описывают процесс прокатки с отношением скоростей рабочих валков до 4, при этом суммарное относительное обжатие составляет 75 % и достигается за два-четыре прохода, исследования с суммарным относительным обжатием, равным 90 %, предполагают небольшое отношение скоростей рабочих валков до 2,0. Вопросы повышения технологической пластичности изучены недостаточно.

1.3 Постановка цели и задач исследования

Целью исследования является повышение технологической пластичности алюминиевых лент за счет рассогласования скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке.

Достижение поставленной цели работы обеспечивается путем постановки и решения следующих задач:

– численного исследования напряженно-деформированного состояния, а также силовых, кинематических и фрикционных параметров процесса асимметричной тонколистовой прокатки алюминиевых лент при отношении скоростей рабочих валков от $V_1/V_2 = 1,0/1,0$ до $V_1/V_2 = 10,0/2,0$;

- экспериментальной проверки и коррекции полученных результатов на новом уникальном лабораторно-промышленном стане 400 асимметричной прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в широком диапазоне отношений их скоростей от $V_1/V_2 = 1,0/1,0$ до $V_1/V_2 = 10,0/1,3$;
- разработки промышленно-применимых технологических схем повышения технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке.

ГЛАВА 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛИСТОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

С целью оценки эффективности асимметричной прокатки, описанной ранее, во второй главе будет выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов и проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния алюминиевых листов при симметричной и асимметричной прокатке.

При этом особое внимание будет уделено изучению закономерностей влияния таких технологических параметров как отношение скоростей рабочих валков, коэффициент контактного трения на кинематику течения металла, истинную деформацию, усилия и моменты прокатки, напряженно-деформированное состояние металла с учетом разогрева при пластической деформации.

2.1 Адаптация программных комплексов к решению задачи асимметричной прокатки алюминиевой ленты

Компьютерное моделирование в обработке металлов давлением используется для всестороннего исследования процесса пластического деформирования, определения характерных особенностей протекания процессов, рассмотрения, и дальнейшего выбора вариантов технологических процессов.

Сложность и большой объем необходимого количества данных, характеризующих эти процессы, вызывает необходимость использования специальных программных комплексов. Анализ полученных данных обеспечивает возможность формирования информационного поля применяемой или планируемой к внедрению технологии и, следовательно, к управлению как процессом, так и свойствами получаемых изделий.

На сегодняшний день известны следующие программные комплексы для моделирования технологических операций обработки металлов давлением DEFORM 2/3D, QForm, ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, MSC.SuperForm, FORGE 2/3 и т.д. Эти программные пакеты хорошо подходят для решения задач обработки металлов давлением с большими пластическими деформациями.

Для решения задач диссертационного исследования был выбран программный продукт DEFORM 2D/3D. Такой выбор был обусловлен, с одной стороны, тем, что DEFORM – это известный, хорошо зарекомендовавший себя, специализированный программный комплекс, предназначенный исключительно для исследования процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки [139-144], а, с другой, наличием специальной лицензии на его использование.

Моделирование процессов в программном комплексе DEFORM производится в следующей последовательности:

- создание моделей объекта исследования и его последующее экспортирование;
- работа в предпроцессоре (создание геометрии заготовки и инструмента, задание движения инструмента, создание конечно-элементной сетки, определение реологической модели материала заготовки и инструмента, задание свойств материалов, задание граничных условий);
- работа в решателе (расчет конечно-элементной задачи в соответствии с алгоритмом решателя по методу сопряженных градиентов или разреженных матриц с генерацией обновленного файла базы данных с результатами решения);
- работа в постпроцессоре программы (обработка результатов моделирование, графическое представление, определение направления течения материала, вывод информации в качестве текстовых, графических и видео файлов, вывод информации).

В программном комплексе DEFORM 2D/3D используется метод конечных элементов, большой вклад в развитие и использование которого в процессах

обработки металлов давлением, внесли зарубежные и отечественные ученые: В. Джонсон, Э. Томсен, Р. Хилл, А.И. Целиков, П.И. Полухин, И.Я. Тарновский, Г.Я. Гун, А.А. Поздеев, В.П. Полухин, А.П. Чекмарев, В.П. Северденко, Г.А. Смирнов-Аляев, В.С. Смирнов, И.Л. Перлин, А.Д. Томленов, Б.В. Кучеряев и др. [144-152].

2.2 Компьютерное моделирование кинематики течения металла при асимметричной прокатке алюминиевого сплава

Компьютерное моделирование и исследование оценки влияния кинематической асимметрии на величину сдвиговой деформации металла, а также совместного воздействия степени деформации, отношения скоростей рабочих валков и коэффициента трения на кинематику течения алюминивно-магниевых сплавов при холодной асимметричной тонколистовой прокатке в условиях плоской деформации проводили в двумерной постановке задачи с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM 2D/3D.

Асимметричная прокатка проводилась при низкой скорости деформирования (менее 5 мм/с), что было связано с изотермическими условиями моделирования. Трение описывалось согласно закону Кулона (2.1) с ограничением (2.2):

$$\tau = \mu p, \text{ при } \mu p < k \quad (2.1),$$

$$\tau = k, \text{ при } \mu p \geq k \quad (2.2),$$

где τ – касательное напряжение трения;

μ – коэффициент трения;

p – контактное нормальное напряжение;

k – предел текучести на сдвиг.

Схема процесса асимметричной тонколистовой прокатки показана на рисунке 2.1. Асимметричную прокатку проводили в рабочих валках одинакового

диаметра за один проход без натяжений.

При моделировании целенаправленно создаваемого процесса асимметричной тонколистовой прокатки были приняты следующие допущения: плоско-деформированное состояние металла; деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; рабочие валки – абсолютно жесткие; изотермический процесс; закон трения – Кулона; кривые текучести были взяты из базы данных DEFORM 2D.

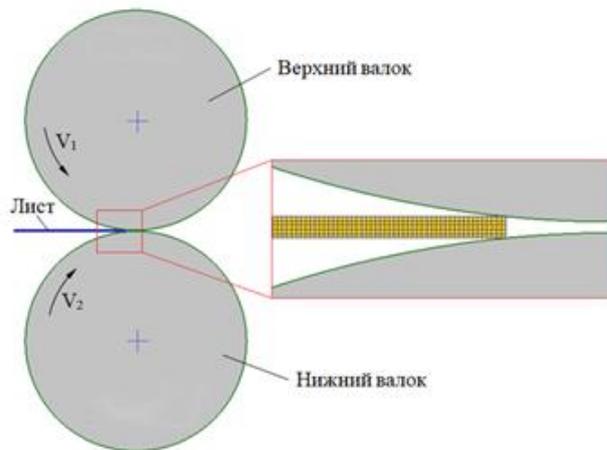


Рисунок 2.1 – Схема процесса асимметричной тонколистовой прокатки

Исходные данные для моделирования процесса: начальная толщина полосы $h_0 = 2,0$ мм; температура деформируемого металла 20 °С; диаметр рабочих валков $D = 100-400$ мм; коэффициент трения $\mu = 0,05-0,4$ [153, 154]; относительное обжатие за проход $\varepsilon = 50-70$ %. Кривую текучести алюминиевых сплавов АМг6 задавали из библиотеки материалов DEFORM 2D/3D. Окружная скорость нижнего валка $V_1 = 5$ мм/с, в то время как окружную скорость верхнего валка V_2 снижали на 10-90 % относительно окружной скорости нижнего валка для создания кинематической асимметрии процесса.

При моделировании процесса асимметричной прокатки оценивали влияние отношения скоростей валков $V_1/V_2 = 10-90$ %, коэффициента трения $\mu = 0,05-0,4$ и степени деформации $\varepsilon = 50-70$ % на положение нейтральных точек и протяженность кинематических зон.

Кинематическая асимметрия, созданная путем рассогласования окружных скоростей валков, существенно меняет кинематику очага деформации по сравнению с симметричным случаем прокатки. При увеличении отношения скоростей валков относительная длина зоны опережения на контакте с верхним валком, вращающимся с меньшей скоростью, возрастает (рисунок 2.2).

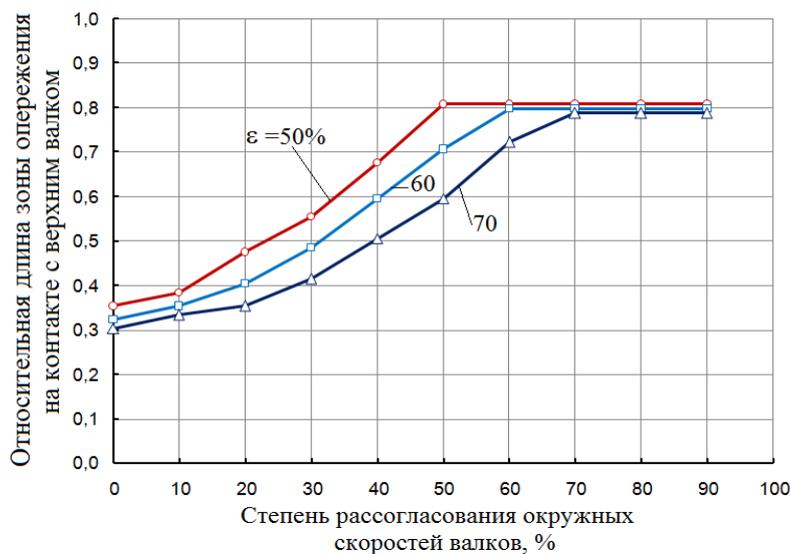


Рисунок 2.2 – Изменение длины зоны опережения на контакте с верхним валком в зависимости от степени рассогласования $\Delta V/V_6$ окружных скоростей валков и обжатия ϵ (при $\mu=0,4$)

Зона опережения увеличивается, пока степень рассогласования $\Delta V/V_6$ не становится равной степени деформации ϵ , но не превышает $\approx 80\%$ от длины очага деформации даже при прокатке с высоким коэффициентом трения $\mu = 0,4$ [153, 154].

В то же время относительная длина зоны опережения на контакте с нижним валком, который вращается с большей скоростью, уменьшается (рисунок 2.3).

Уменьшение зоны опережения происходит до тех пор, пока степень рассогласования $\Delta V/V_6$ не становится равной степени деформации ϵ . При степени рассогласования скоростей равной степени деформации на всей длине очага деформации реализуется зона отставания, и дальнейшее увеличение степени

рассогласования скоростей не приводит к изменению протяженности кинематических зон.

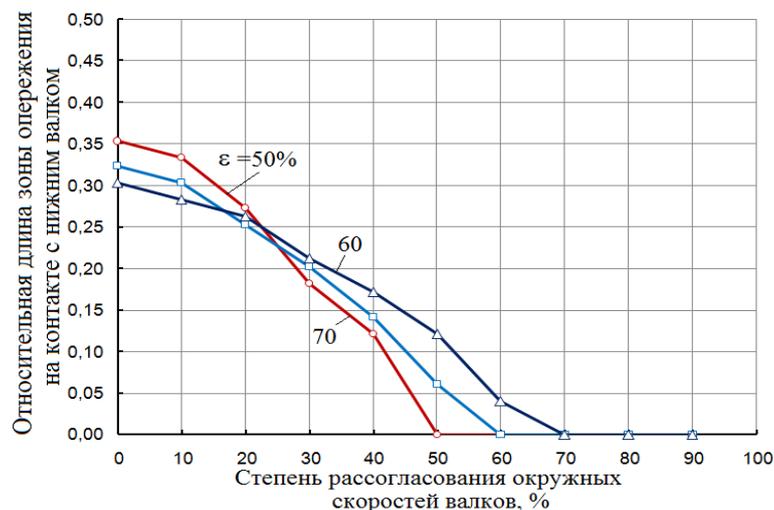


Рисунок 2.3 – Изменение длины зоны опережения на контакте с нижним валком в зависимости от степени рассогласования $\Delta V/V_6$ окружных скоростей валков и обжатия ϵ (при $\mu=0,4$)

Таким образом, если $\Delta V/V_6 < \epsilon$, то происходит общий случай асимметричной прокатки, когда в очаге деформации присутствуют кинематические зоны отставания и опережения, но протяженности этих зон со стороны верхнего и нижнего валков различны. При $\Delta V/V_6 = \epsilon$ реализуется полупредельный случай асимметричной прокатки, при котором на верхнем валке имеются зоны отставания и опережения, а на нижнем валке только зона отставания. Максимальное трение, когда касательные напряжения равны пределу текучести на сдвиг ($\tau = k$), обеспечивает протекание предельного случая асимметричной прокатки, когда нейтральные точки принимают крайние положения в очаге деформации и на контакте с верхним валком имеется только зона опережения, а на контакте с нижним — только зона отставания [132].

Уменьшение коэффициента трения приводит к уменьшению протяженности зоны опережения на контакте с верхним валком (рисунок 2.4). Например, при уменьшении коэффициента трения с 0,4 до 0,053-0,060 в зависимости от степени

деформации зона опережения может полностью исчезнуть и процесс прокатки может остановиться. Таким образом, наличие зоны опережения, как минимум на одном из валков является критерием осуществимости процесса асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков.

На рисунках 2.5 и 2.6 показаны поля скоростей металла в очаге деформации при симметричной (рисунок 2.5) и асимметричной (рисунок 2.6) прокатке. В симметричном случае скорость течения металла на верхней и нижней дугах контакта одинаковы (рисунок 2.7), поэтому сдвиговые деформации при обычной прокатке небольшие или полностью отсутствуют.

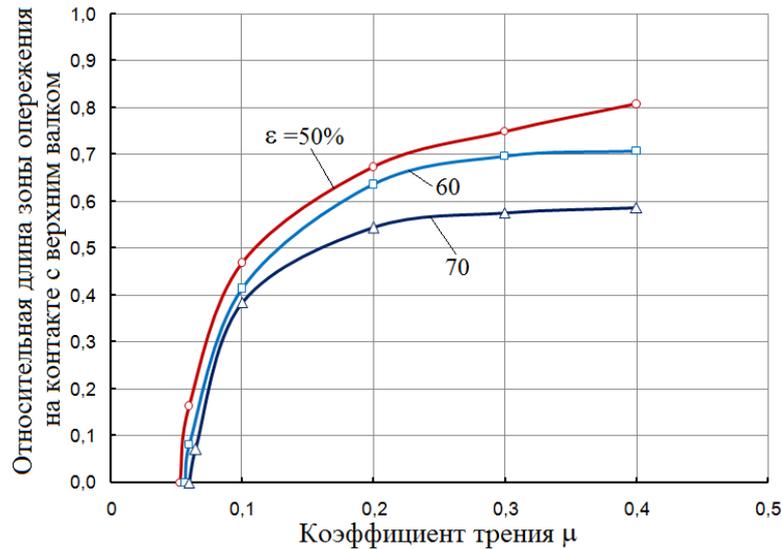


Рисунок 2.4 – Изменение длины зоны опережения на контакте с верхним валком в зависимости от коэффициента трения и степени деформации при асимметричной прокатке ($\Delta V/V_0 = 50\%$)

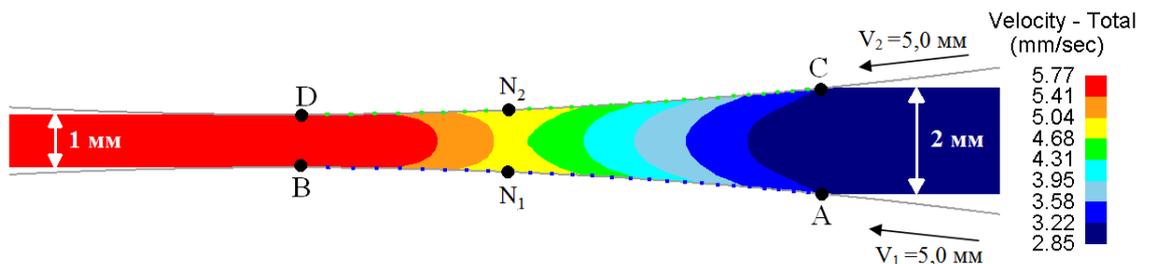


Рисунок 2.5 – Поле скоростей при симметричной прокатке алюминиевой полосы ($\varepsilon = 50\%$, $\mu = 0,4$)

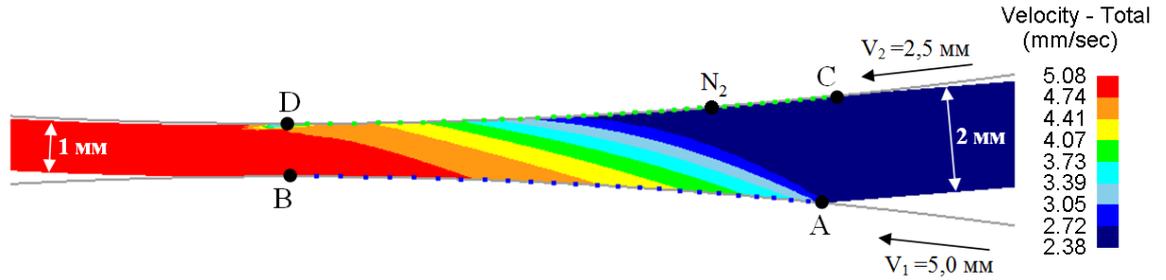


Рисунок 2.6 – Поле скоростей при асимметричной прокатке алюминиевой полосы ($\Delta V/V_0=50\%$, $\varepsilon = 50\%$, $\mu = 0,4$)

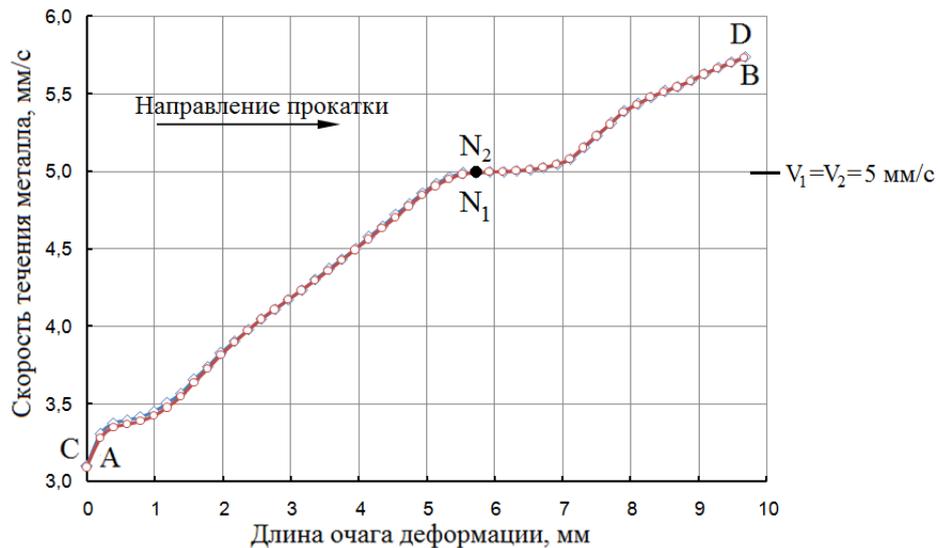
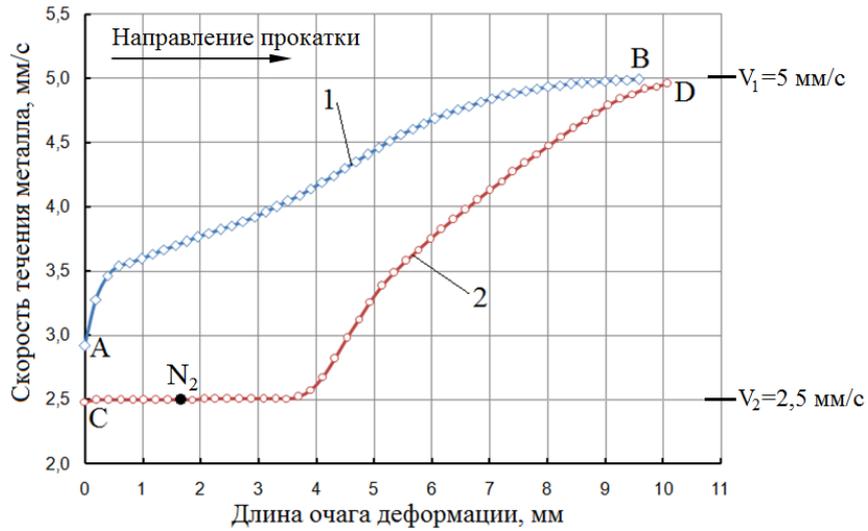


Рисунок 2.7 – Скорость течения металла на контакте с нижним и верхним валками при симметричной прокатке ($\varepsilon = 50\%$ и $\mu = 0,4$)

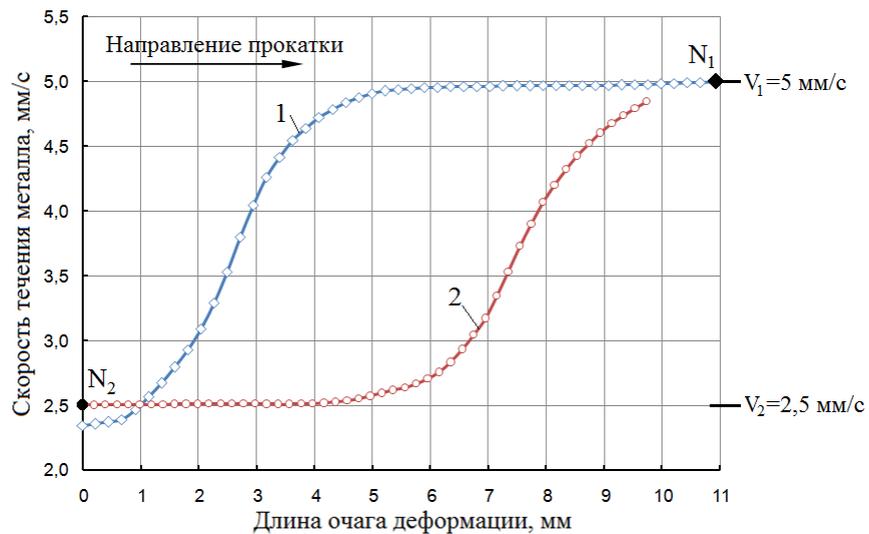
Асимметричная прокатка при $\Delta V/V_0 = \varepsilon$ в сочетании с большим коэффициентом трения (в особенности, при максимальном трении, когда $\tau = k$), приводит к существенному различию скоростей течения металла в очаге деформации на контакте с верхним и нижним валками (рисунки 2.8 и 2.9).

Течение металла происходит с большей скоростью на контакте с валком, обладающим большей скоростью вращения. При этом на выходе из очага деформации наблюдается уменьшение разницы скоростей течения металла на верхнем и нижнем валках (в точках В и D на рисунках 2.8 и 2.9).



1 – валок; 2 – нижний валок

Рисунок 2.8 – Скорости течения металла на контакте с валками при асимметричной прокатке ($\Delta V/V_6 = 50 \%$, $\varepsilon = 50 \%$ и $\mu = 0,4$)



1 – валок; 2 – нижний валок

Рисунок 2.9 – Скорости течения металла на контакте с валками при асимметричной прокатке ($\Delta V/V_6 = 50 \%$, $\varepsilon = 50 \%$)

При снижении коэффициента трения с 0,4 до 0,06 происходит, с одной стороны, абсолютное уменьшение скоростей течения металла на контакте с обоими валками (рисунки 2.10 и 2.11), а с другой стороны, уменьшается относительная разница скоростей течения металла. Например, при $\mu = 0,06$ и $\Delta V/V_6 = 50 \%$

скорость течения металла на контакте с нижним и верхним валками равна 2,5 мм/с (рисунки 2.10 и 2.11). Это связано с уменьшением зоны опережения на верхнем валке.

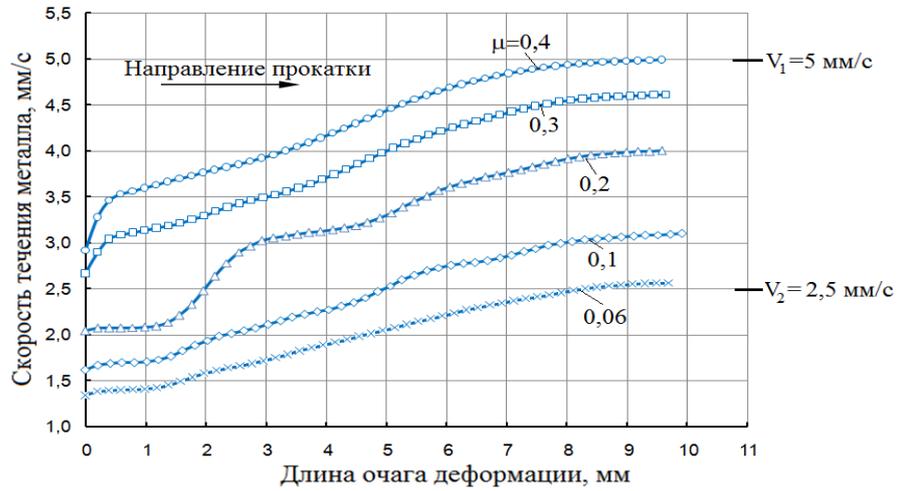


Рисунок 2.10 – Скорость течения металла на контакте с нижним валком при асимметричной прокатке с различным коэффициентом трения ($\Delta V/V_0 = 50\%$, $\varepsilon = 50\%$)

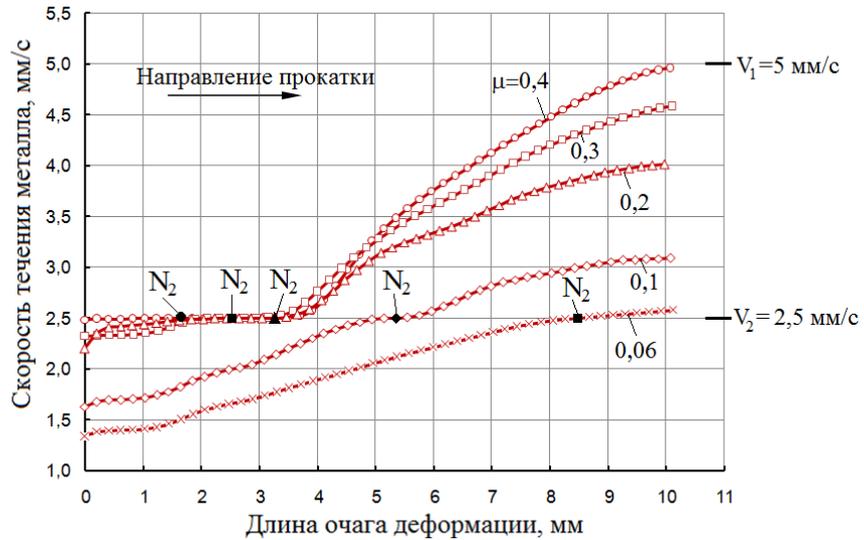


Рисунок 2.11 – Скорость течения металла на контакте с верхним валком при асимметричной прокатке с различным коэффициентом трения ($\Delta V/V_0 = 50\%$, $\varepsilon = 50\%$)

Деформация сдвига, характеризующаяся тангенсом угла φ (рисунок 2.12), определяется относительной разницей скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками при асимметричной прокатке. Поэтому, даже при прокатке с большим отношением скоростей рабочих валков, но при небольшом коэффициенте трения, деформации сдвига в материале полосы практически отсутствуют (рисунок 2.13), так как скорость течения металла на контакте с верхним и нижним валками практически равна [17].

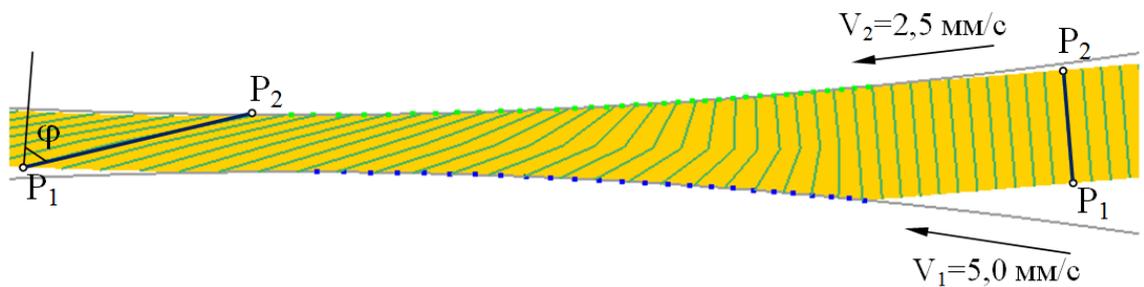


Рисунок 2.12 – Линии Лагранжа и угол сдвига φ при асимметричной прокатке алюминиевой полосы ($\Delta V/V_6 = 50 \%$, $\varepsilon = 50 \%$, $\mu = 0,4$)

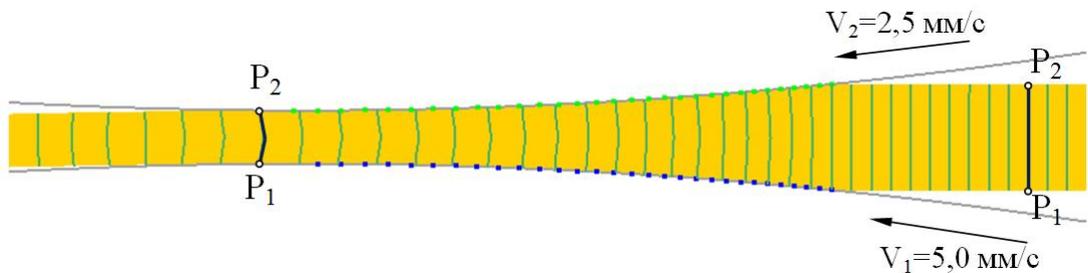


Рисунок 2.13 – Линии Лагранжа при асимметричной прокатке алюминиевой полосы ($\Delta V/V_6 = 50 \%$, $\varepsilon = 50 \%$, $\mu = 0,06$)

Таким образом, возможность реализации высоких сдвиговых деформаций в процессе асимметричной прокатки определяется кинематикой течения металла в очаге деформации. Необходимо сочетание большого отношения скоростей валков и большого контактного трения, что позволяет создать в материале интенсивные сдвиговые деформации.

2.3 Компьютерное моделирование сдвиговых деформаций при асимметричной прокатке алюминиевого сплава

При асимметричной прокатке деформацию сдвига, которая характеризуется тангенсом угла φ , определяет относительная разница скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками (рисунок 2.14).

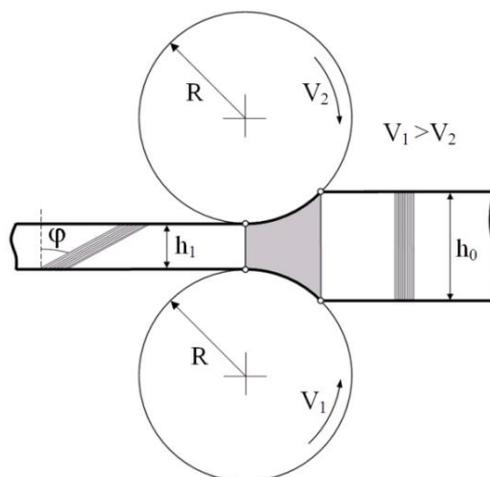


Рисунок 2.14 – Угол сдвига φ при асимметричной прокатке

Если угол сдвига $\varphi > 80^\circ$, то истинная деформация, рассчитанная по формуле (1.7) является практически идентичной независимо от степени обжатия заготовки при асимметричной тонколистовой прокатке.

Чтобы достичь больших деформаций угол сдвига φ должен быть достаточно большим. Его величина существенным образом зависит от технологических параметров процесса асимметричной прокатки. Анализ полученных результатов расчета показал, что максимальные значения истинной деформации в материале заготовки обеспечиваются при следующих условиях:

- уменьшение толщины исходной заготовки с 8,0 до 1,0 мм;
- увеличение диаметра валков с 50 до 500 мм;
- увеличение коэффициента контактного трения с 0,1 до 0,4.

Это объясняется необходимостью создания высоких противоположно направленных сил трения, действующих в очаге деформации на контакте с верхним

и нижним валками. Влияние относительного обжатия и отношения скоростей валков является более сложным. Показано, что истинная деформация ϵ возрастает с возрастанием отношения скоростей рабочих валков и при отношении скоростей рабочих валков на 4-24 % меньше отношения входной и выходной толщин листа достигает экстремальных значений (рисунки 2.15, 2.16).

Высокое трение является причиной неравномерности деформации при асимметричной прокатке. Коэффициент трения, отношение скоростей валков и относительное обжатие за проход – это основные факторы, которые обеспечивают синергетический эффект при создании интенсивной пластической деформации в металле методом асимметричной прокатки. Например, при коэффициенте трения 0,1 и обжатии 50 % увеличение отношения скоростей валков даже до 2 не приводит к существенному увеличению истинной деформации в металле в сравнении с симметричными условиями деформирования (рисунок 2.16).

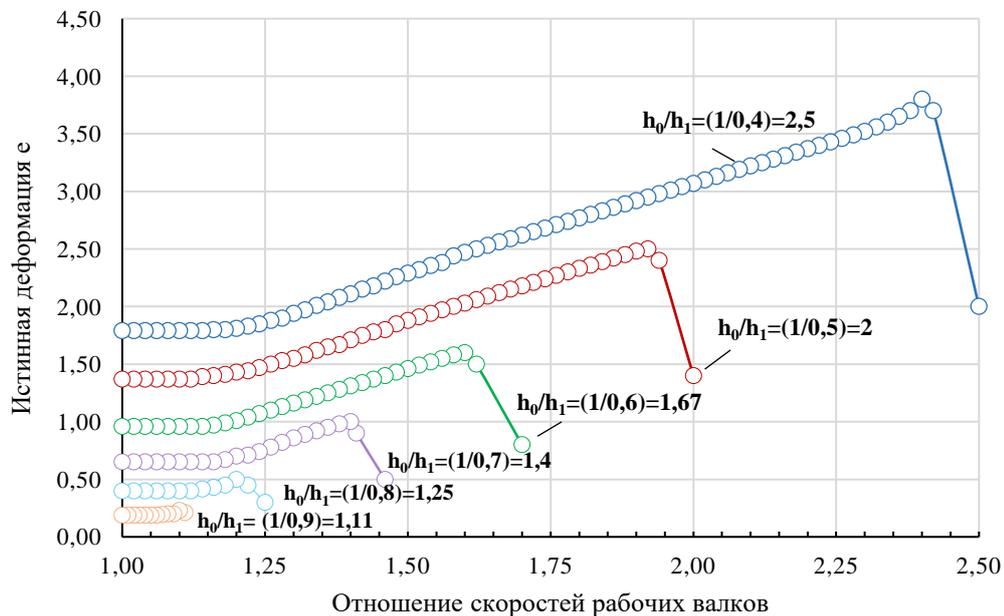


Рисунок 2.15 – Влияние относительного обжатия ϵ и отношения скоростей валков на величину истинной деформации материала при асимметричной тонколистовой прокатке

$$(h_0 = 1 \text{ мм}, \mu = 0,4)$$

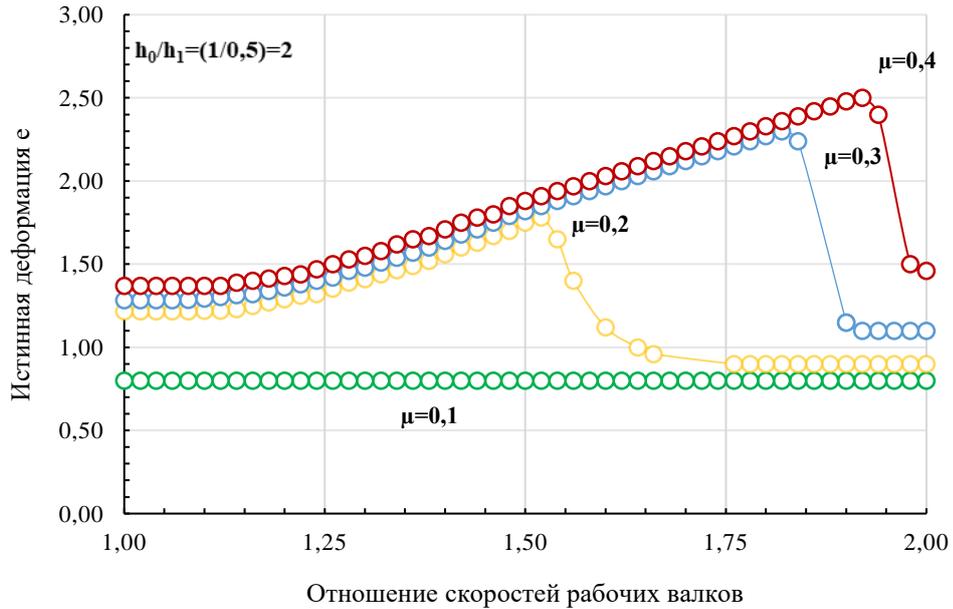
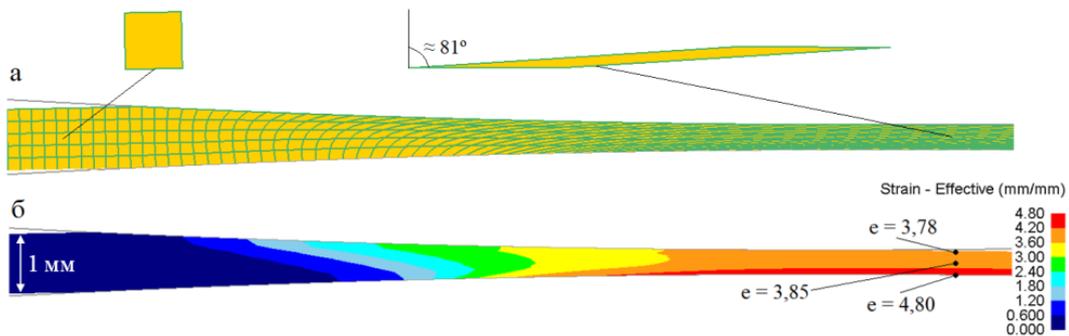


Рисунок 2.16 – Влияние коэффициента трения и отношения скоростей валков на величину истинной деформации материала при асимметричной тонколистовой прокатке ($h_0 = 1 \text{ мм}, \varepsilon = 50 \%$)

Сетка Лагранжа и поле интенсивности деформации для этого случая показаны на рисунке 2.17. Квадратная ячейка трансформируется в параллелограмм (рисунок 2.17, а). Угол сдвига φ в центральном слое материала заготовки равен $\approx 81^\circ$ и обеспечивает истинную деформацию на уровне = 3,85, что вполне согласуется с расчетом по формуле (1.7).



а – сетка Лагранжа; б – поле интенсивности деформации

Рисунок 2.17 – Сетка Лагранжа и поле интенсивности деформации при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига ($D = 500 \text{ мм}, \varepsilon = 60\%, \Delta V = 57\%, \mu = 0,4$)

В результате поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно меняется. Это обеспечивает немонотонность деформации при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига (рисунок 2.18).

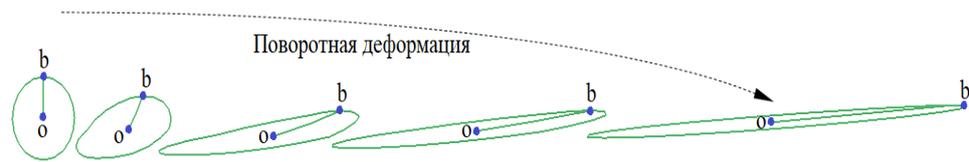


Рисунок 2.18 – Поворотная деформация при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига

На рисунках 2.19 и 2.20 показано влияние отношения скоростей валков, а также начальной толщины листа и диаметра валков на величину деформации обрабатываемого металла.

В общем случае, для создания более интенсивных деформаций необходимо уменьшать начальную толщину исходной листовой заготовки, а асимметричную прокатку проводить в валках как можно большего диаметра.

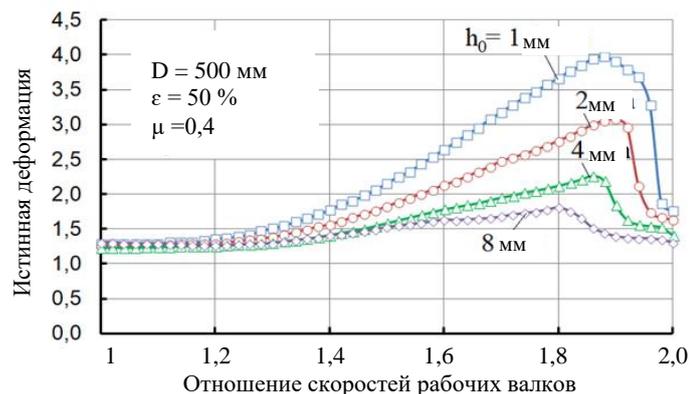


Рисунок 2.19 – Влияние отношения скоростей валков и начальной толщины листа на величину накопленной деформации

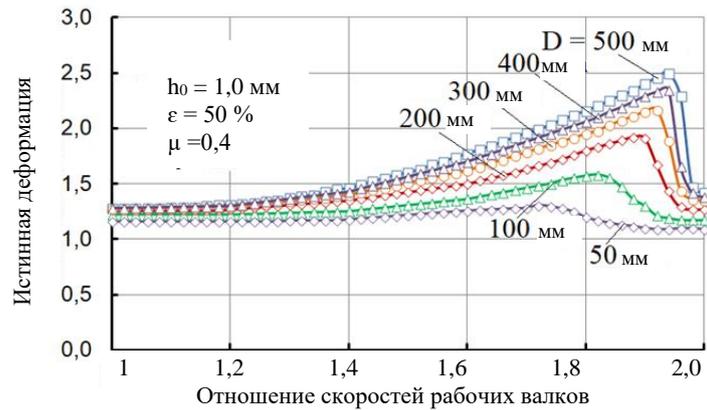


Рисунок 2.20 – Влияние отношения скоростей и диаметра валков на величину накопленной деформации

Таким образом, при асимметричной тонколистовой прокатке, совмещающей схемы простого и чистого сдвига, поворотная мода деформации обеспечивает немонотонность течения металла, что является одной из существенных характеристик данного способа обработки металлов давлением.

Ассиметричная прокатка имеет перспективу практического применения в производстве как способ получения тонких листов и полос из различных металлов и сплавов, обладающих высокой прочностью и пластичностью.

2.4 Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния металла с учетом деформационного разогрева

При решении тепловой задачи были заданы теплофизические параметры деформируемых алюминиево-магниевых сплавов: коэффициент теплопроводности $180,2 \text{ Н/сек/}^\circ\text{С}$; коэффициент теплоемкости $2,433 \text{ Н/мм}^2/\text{}^\circ\text{С}$; коэффициент черноты $0,02$. А также заданы теплофизические параметры материала валков: коэффициент теплопроводности $50,71 \text{ Н/сек/}^\circ\text{С}$; коэффициент теплоемкости $3,81 \text{ Н/мм}^2/\text{}^\circ\text{С}$. Теплообмен поверхности деформируемой заготовки с окружающей средой и инструментом моделировался заданием граничных условий в виде конвективного и кондуктивного теплообмена. Для этого задавались

коэффициент конвекции $0,02 \text{ Н/сек/мм/}^\circ\text{С}$, температура окружающей среды $20 \text{ }^\circ\text{С}$, коэффициент теплоотдачи на контакте заготовки с рабочими валками $11 \text{ Н/сек/мм/}^\circ\text{С}$. Кривую текучести алюминиевого сплава АМгб задавали из библиотеки материалов DEFORM 2D/3D.

При моделировании были приняты следующие допущения:

- плоско-деформированное состояние металла;
- деформируемая среда – вязкопластическая;
- рабочие валки – абсолютно жесткие;
- закон контактного трения – Кулона;
- условия деформирования – неизотермические.

Исходные данные для моделирования:

- начальная толщина полосы $h_0 = 2,0 \text{ мм}$;
- начальная температура деформируемого металла $20 \text{ }^\circ\text{С}$;
- диаметр рабочих валков $D = 340 \text{ мм}$;
- коэффициент контактного трения $\mu = 0,1-0,4$;
- степень деформации $\varepsilon = 50-66 \text{ \%}$;
- окружная скорость нижнего валка $V_1 = 100 \text{ мм/сек}$;
- отношение скоростей валков $V_1/V_2 = 1-5$.

Прокатку проводили за один проход без натяжений. Для деформируемой полосы задавали сетку конечных элементов с 2000 четырехугольных элементов. Для рабочих валков сетка состояла из 10000 конечных элементов с коэффициентом сгущения $0,3$ у поверхности. Анализ силовых параметров процесса, а также характеристик напряженно-деформированного состояния металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава проводили сравнением с симметричным случаем деформирования при $V_1/V_2=1$. При моделировании асимметричной прокатки скорость верхнего валка уменьшали в 2 (при $\varepsilon = 50 \text{ \%}$) или в 5 (при $\varepsilon = 66 \text{ \%}$) раза относительно скорости нижнего валка.

При асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава АМгб с обжатием $\varepsilon = 50 \text{ \%}$ максимальное значение усилия прокатки снижается в 1,3 раза с

255,0 кН до 194,6 кН в сравнении с симметричным случаем. При прокатке с обжатием $\varepsilon = 66\%$ эффект снижения усилия прокатки еще выше и составляет 3,2 раза с 610,0 кН до 192,2 кН (рисунок 2.21).

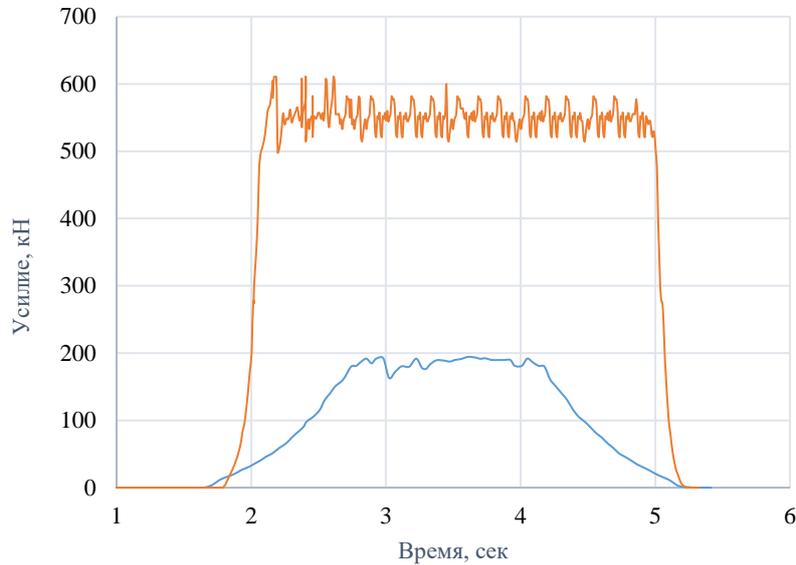


Рисунок 2.21 – Изменение усилия прокатки во времени при симметричной и асимметричной прокатке с обжатием $\varepsilon = 66\%$ при $V_1 = 100$ мм/сек

Снижение усилия прокатки на участке (рисунок 2.21) объясняется снижением напряжения текучести алюминиево-магниевого сплава при деформационном разогреве. При обжатии $\varepsilon = 66\%$ этот эффект существенно выше.

Результаты расчета показали, что усилие прокатки при обжатиях 50-66 % и отношении скоростей валков $V_1/V_2 = 2-5$ снижается в 1,3-3,2 раза в сравнении с симметричными условиями деформирования, однако при этом происходит существенное изменение моментов прокатки.

При симметричной прокатке моменты на верхнем и нижнем валках одинаковые и составляют $\approx 3,8$ кН·м при $\varepsilon = 66\%$. При асимметричной прокатке момент на нижнем валке скачкообразно возрастает в 1,4 раза до $\approx 5,6$ кН·м, а на верхнем убывает в 1,3 раза до $\approx 2,9$ кН·м при $\varepsilon = 66\%$.

Это связано с уменьшением усилия прокатки, с одной стороны, из-за более высокого деформационного разогрева металла, а с другой, – из-за более высоких сдвиговых деформаций при увеличении отношения скоростей валков до $V_1/V_2 = 5$.

Сдвиговые деформации при асимметричной прокатке характеризуются углом сдвига ϕ слоев металла [135-140].

Асимметричная прокатка полос и лент из алюминиевых сплавов характеризуется значительным деформационным разогревом в очаге деформации. Так, даже при прокатке ленты с отношением скоростей валков $V_1/V_2=1000/500$, температура металла всего за 0,02 сек. возрастает с 20 до 325-379 °С (рисунок 2.22).

Через 0,01 сек. после выхода температура металла составляет 324 °С. При дальнейшем охлаждении полосы на воздухе температура металла снижается с 324 °С до 24 °С за 200 сек.

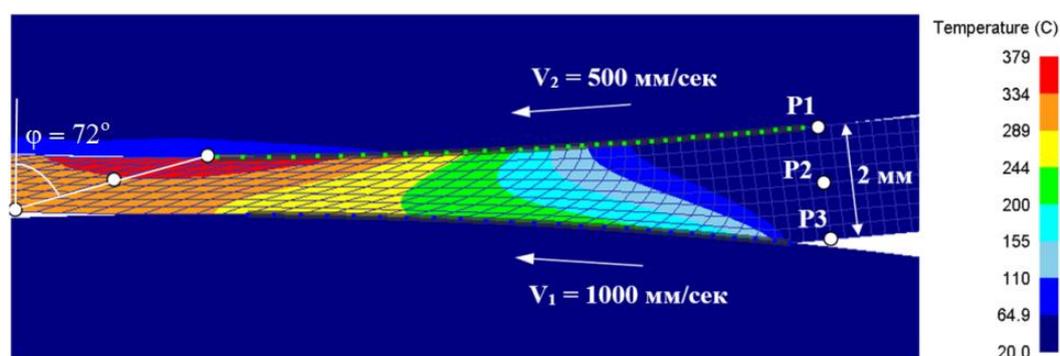


Рисунок 2.22 – Температурное поле в очаге деформации при асимметричной прокатке ($h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $D=200$ мм, $\varepsilon=50\%$)

Таким образом, в результате компьютерного исследования показано, что даже увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2 вызывает существенный разогрев металла до 379 °С. Это показывает, что при асимметричной прокатке одновременное увеличение отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия ограничено температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать начальную температуру плавления сплава.

Дополнительно были исследованы силовые параметры процесса прокатки алюминиевых сплавов Д16 и АД33 при увеличении отношения скоростей рабочих валков от 1 до 5.

Кривые текучести алюминиевых сплавов Д16 и АД33 задавали из библиотеки материалов DEFORM 2D/3D.

При моделировании были приняты следующие допущения:

- плоско-деформированное состояние металла;
- деформируемая среда – вязкопластическая;
- рабочие валки – абсолютно жесткие;
- закон контактного трения – Кулона;
- условия деформирования – неизотермические.

Исходные данные для моделирования:

- начальная толщина полосы $h_0 = 1,9-6,0$ мм;
- начальная температура деформируемого металла 20 °С;
- диаметр рабочих валков $D = 340$ мм;
- коэффициент контактного трения $\mu = 0,1-0,4$;
- степень деформации $\varepsilon = 60-87$ %;
- окружная скорость нижнего валка $V_1 = 100$ мм/сек;

Скорость верхнего валка уменьшали в 5 раз относительно скорости нижнего валка.

Результаты моделирования усилия прокатки алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Изменение усилия прокатки алюминиевых сплавов Д16 и АД33

Алюминиевый сплав	Отношение скоростей рабочих валков V_1/V_2	Относительное обжатие, %	Усилие, кН
АД33	1	64	396,2
АД33	5	64	136,9
Д16	1	87	1413,0
Д16	5	87	408,5

Таким образом, увеличение отношения скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 5$ приводит к снижению усилия прокатки при обжатиях 60-87 % и отношении

скоростей валков $V_1/V_2 = 5$ в 2,9-3,5 раза в сравнении с симметричными условиями деформирования для сплавов АД33 и Д16 соответственно.

2.5 Выводы по второй главе

Разработка компьютерной модели тонколистовой прокатки для получения алюминиевых лент осуществлялась с применением программного комплекса DEFORM 2D/3D.

В результате проведенных научных исследований:

1) Показано, что истинная деформация e для алюминиевых лент достигает экстремальных значений при отношении скоростей рабочих валков равном $(0,76...0,96) \cdot h_0/h_1$, где h_0 и h_1 – входная и выходная толщины листа.

2) Выявлено, что особенностью процесса асимметричной прокатки, совмещающей схемы простого и чистого сдвига, с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 5$ является значительное снижение (более чем в 2,9 раз) усилия прокатки по сравнению с обычной прокаткой.

4) Установлено, что уменьшение коэффициента трения с 0,4 до 0,1 приводит к значительному снижению истинной деформации в обрабатываемом металле, даже если отношение скоростей валков очень велико.

5) Установлено, что даже увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2 вызывает существенный разогрев металла до 379 °С. Это показывает, что при асимметричной прокатке одновременное увеличение отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия ограничено температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать начальную температуру плавления сплава.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ И ТВЕРДОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛЕНТ НА ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННОМ СТАНЕ ДУО 400 АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

Специалистами лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» в рамках выполнения проекта №15-19-10030 Российского научного фонда (2015-2022 гг.) спроектирован и изготовлен не имеющий аналогов в РФ опытно-экспериментальный лабораторно-промышленный стан дуо 400 с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной и аккумуляющей прокатки с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящими моментами 2·65 кН·м, что обеспечивает возможность получения и испытания полноразмерных опытных образцов из различных металлов и сплавов [5, 155-162].

Технические характеристики опытно-экспериментального лабораторного стана дуо представлены в таблице 3.1. Габаритные размеры представлены на рисунке 3.1. Все органы регулирования и контроля работы прокатного стана объединены на одном пульте управления с сенсорной панелью и расположены на безопасном удалении от стана. Система управления прокатным станом обеспечивает мониторинг в режиме реального времени с цифровой (количественной) индикацией параметров технологического процесса [3, 155-162].

Данный стан предполагает обработку как черных (сталь), так и цветных (алюминий, медь, титан) металлов и их сплавов.

Таблица 3.1 – Технические характеристики опытно-экспериментального лабораторного стана дуо

Параметр	Значение
Тип	Реверсивный дуо с индивидуальным приводом рабочих валков
Нажимное устройство	Гидравлическое

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Значение
Диаметр рабочих валков	340 мм
Длина бочек рабочих валков	400 мм
Усилие прокатки (max)	2500 кН (250 тс)
Крутящие моменты (max)	2·65 кН·м
Мощность главного привода	2·75 кВт
Толщина прокатываемых листовых заготовок	от 50 мм до 0,5 мм
Прокатываемые материалы	Al, Fe, Ti, а также другие металлы и сплавы с σ_T до 1500 МПа
Реализуемые технологии	<ul style="list-style-type: none"> – симметричная прокатка; – асимметричная прокатка; – криогенная прокатка; – аккумуляторная прокатка;
Общая масса оборудования	20 тонн

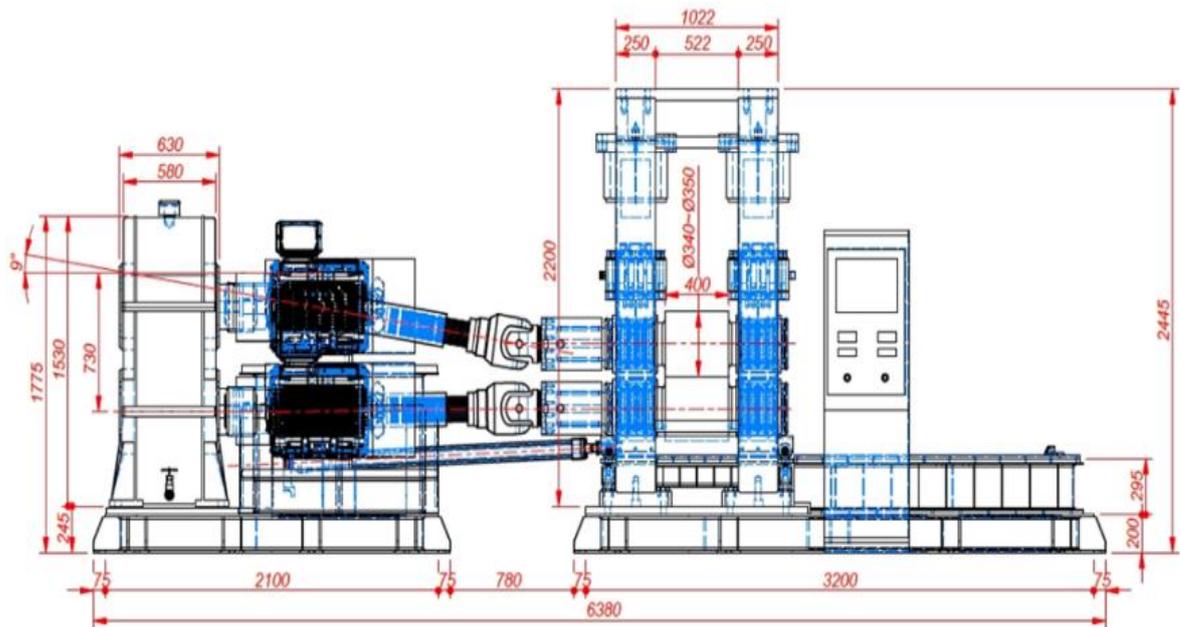


Рисунок 3.1 – Габаритные размеры опытно-экспериментального лабораторного стана дуо с индивидуальным приводом рабочих валков

В третьей главе будет выполнена проверка адекватности полученных во второй главе результатов компьютерного моделирования. Кроме этого, будет выполнено экспериментальное исследование процессов асимметричной прокатки

алюминиевых лент на лабораторно-промышленном стане дуо 400 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

3.1 Описание проведенных исследований

Для экспериментального исследования выбирались наиболее распространённые алюминиевые сплавы Д16 (2xxx серия), АМг6 (5xxx серия) и АД33 (6xxx серия), широко применяемые в различных отраслях промышленности, описание которых приведено в первой главе.

Химический состав алюминиевых сплавов был подтверждён атомно-эмиссионным спектральным анализом. Химический состав сплава Д16 представлен Si – 0,26 %; Fe – 0,39 %; Cu – 4,00 %; Mn – 0,55 %; Mg – 1,48 %; Cr – 0,018 %; Zn – 0,16 %; Ti – 0,043 %; Ni – 0,030 %; Be – 0,0018 %; Al – 93,09 %.

Химический состав АМг6 представлен Si – 0,17 %; Fe – 0,27 %; Cu – 0,045 %; Mn – 0,64 %; Mg – 6,15 %; Cr – 0,011 %; Zn – 0,027 %; Ti – 0,035 %; Ni – 0,008 %; Be – 0,0018 %; Al – 92,7 %.

Химический состав сплава АД33: Si – 0,58 %; Fe – 0,48 %; Cu – 0,22 %; Mn – 0,11 %; Mg – 0,80 %; Cr – 0,15 %; Zn – 0,080 %; Ti – 0,035 %; Be – 0,0014 %; Al – 97,45 %.

Листовые заготовки имели размеры:

- образцы из сплава Д16 – толщина 6,0 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм;
- образцы из сплава АМг6 – толщина 1,9 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм;

- образцы из сплава АД33 – толщина 2,0 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм.

В ходе экспериментов прокатку образцов алюминиевых сплавов осуществляли за один проход в симметричном и асимметричном режимах. Для обеспечения достоверности полученных результатов десять образцов прокатывали в каждом выбранном режиме.

При этом варьировали следующие параметры:

- относительное обжатие за проход от 5 до 89 %;
- отношение скоростей рабочих валков от 1,0 до 7,7.

В экспериментах измеряли:

- усилие прокатки, кН;
- моменты прокатки на рабочих валках, кН·м;
- конечную толщину образца, мм;
- механические свойства образцов в соответствии с ГОСТ 1497-84 (σ_B , Н/мм²; $\sigma_{0.2}$, Н/мм²; δ , %) [163];
- твердость по Бринеллю не менее, чем в трех точках с каждой поверхности, НВ [164].

Измерение усилия и моментов прокатки осуществлялось с помощью системы управления лабораторно-промышленного стана дуо 400, обеспечивающей запись количественного изменения параметров технологического процесса. В ходе экспериментов выполнялось условие повторяемости (сходимости) результатов (с 95 %-ной доверительной вероятностью) измерения усилия и моментов прокатки [165, 166].

Измерение толщины лент, полученных после прокатки производили цифровым микрометром 06-11-44. В ходе экспериментов выполнялось условие повторяемости (сходимости) результатов (с 95 %-ной доверительной вероятностью) измерения толщины полученных после прокатки лент, при этом расхождение между результатами составило от 0,001 мм (для толщины 0,5 мм) до 0,005 мм (для толщины 5,3 мм) [165, 166].

Замер твердости полученных алюминиевых лент осуществляли на твердомере EMCO TEST M4C/R G3, методом Бринелля. В ходе экспериментов выполнялось условие повторяемости (сходимости) результатов (с 95 %-ной доверительной вероятностью) измерения твердости полученных после прокатки лент [165, 166].

Механические свойства образцов алюминиевых лент исследовали на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type, определялись предел прочности, предел текучести, а также относительное удлинение алюминиевых лент после разрыва. В ходе экспериментов выполнялось условие повторяемости (сходимости) результатов (с 95 %-ной доверительной вероятностью) измерения толщины полученных после прокатки лент [165, 166].

Листовые заготовки алюминиевых сплавов подвергались прокатке при комнатной температуре. Прокатку вели без смазки, на сухих валках во всех случаях. Высокое значение коэффициента трения достигалось предварительной прокаткой (не менее 5 мин.) заготовок из сплавов алюминия.

Дополнительно были проведены эксперименты по прокатке со смазкой.

3.2 Исследование влияния отношения скоростей рабочих валков на усилие прокатки, технологическую пластичность и твердость алюминиевых лент

3.2.1 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из Д16 с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
23.09.2021–9	6,00	3,10	48	463,80	5,0/5,0	104	Образец разрушился
23.09.2021–19 (3)	6,00	2,60	58	181,40	8,0/4,0	118	Образец разрушился
23.09.2021–41	6,00	2,00	67	215,10	9,0/3,0	86	Образец разрушился
23.09.2021–61	6,00	1,90	68	188,60	8,0/2,0	88	Образец разрушился

Продолжение таблицы 3.2

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
23.09.2021–92	6,00	0,90	85	243,00	10,0/2,0	73	Образец сохранил целостность
23.09.2021–94	6,00	0,65	89	230,00	10,0/1,5	68	Образец сохранил целостность
23.09.2021–95	6,00	-	-	-	10,0/1,3	-	Образец расплавился

При обычной симметричной прокатке ($V_1/V_2 = 5,0/5,0$) термически упрочняемого алюминиевого сплава Д16 за один проход образец разрушился при попытке деформировать его до толщины 3,1 мм (обжатие 48 %). Усилие прокатки при этом составило 463,8 кН. Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 5 раз ($V_1/V_2 = 10,0/2,0$) приводит к снижению усилия прокатки более чем в 3,2 раз (до 144,7 кН) при степени обжатия, соответствующей степени обжатия в симметричном режиме, при которой образец разрушился.

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2 = 10,0/1,5$ позволило получить алюминиевую ленту конечной толщиной 0,65 мм. Усилие прокатки при этом составило 230,0 кН.

При отношении скоростей валков 7,7 ($V_1/V_2=10,0/1,3$) происходит расплавление образца.

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 5 раз ($V_1/V_2 = 10,0/2,0$) приводит к снижению усилия прокатки более чем в 3,2 раз (с 463,8 кН до 144,7 кН) при степени обжатия, соответствующей степени обжатия в симметричном режиме. Изменение усилия прокатки в зависимости от степени обжатия образцов алюминиевого сплава Д16 при различных отношениях скоростей валков представлено на рисунке 3.2 [167].

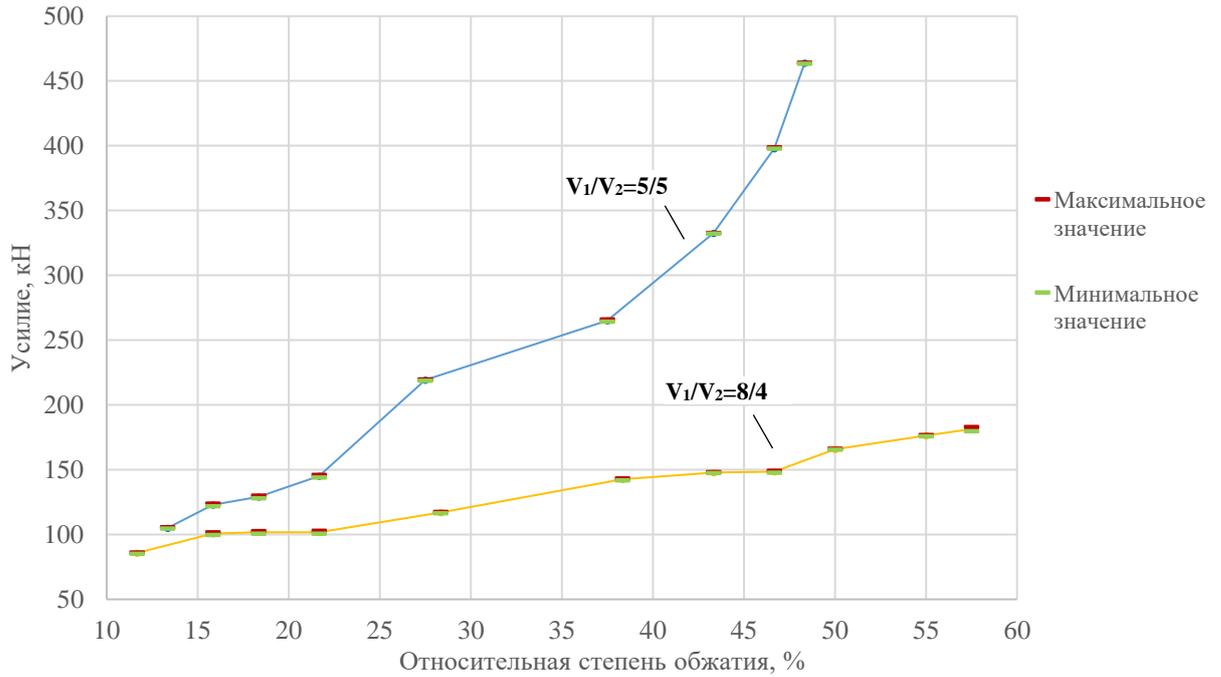


Рисунок 3.2 – Изменение усилия прокатки в зависимости от относительного обжатия образцов алюминиевого сплава Д16 при различных отношениях скоростей валков

Зависимости твердости алюминиевых лент Д16, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлена на рисунке 3.3.

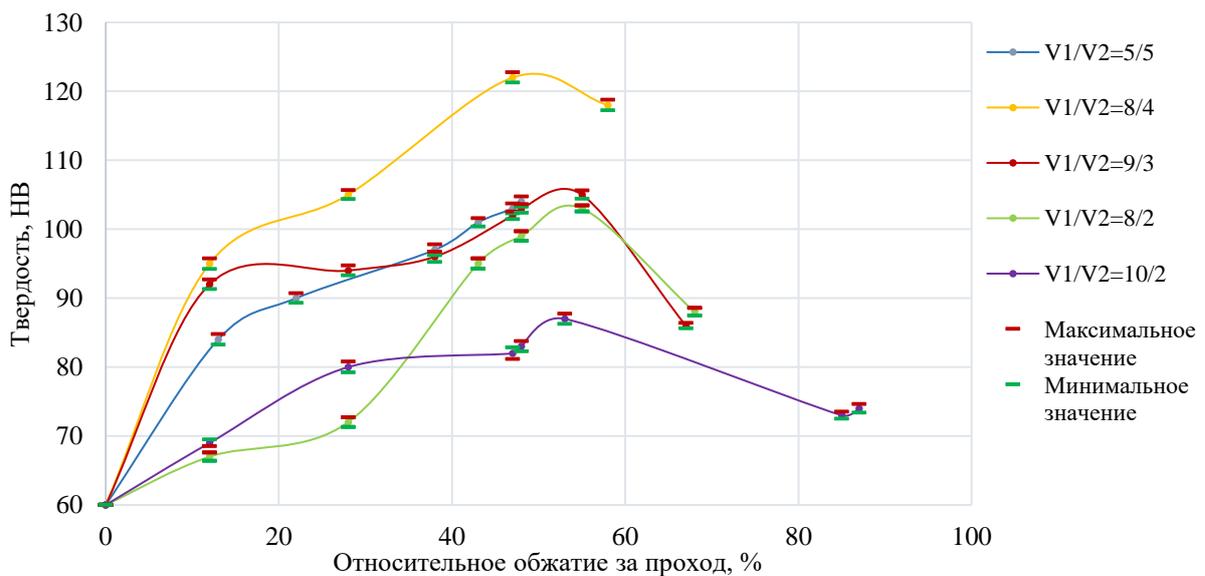


Рисунок 3.3 – Зависимости твердости лент из алюминиевого сплава Д16 от относительного обжатия

Из таблицы 3.2 и рисунка 3.3 видно, что, изменяя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие, можно регулировать твердость лент из алюминиевого сплава Д16, так наибольшее значение твердости 122 НВ было достигнуто в Д16 при отношении скоростей $V_1/V_2=8,0/4,0$ и обжатии 47 %, а наименьшее – 68 НВ – при отношении скоростей $V_1/V_2=10,0/1,5$ и обжатии 89 % [167, 168].

Механические свойства алюминиевых лент при прокатке с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Механические свойства лент из сплава Д16, полученных после прокатки

Образец	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	Относительное удлинение, δ , %
Образец после асимметричной прокатки без смазки ($V_1/V_2 = 10,0/2,0$; относительное обжатие за проход 87 %)	283,6±1,3	234,4±1,1	0,83	12,3±0,13
Образец после асимметричной прокатки со смазкой ($V_1/V_2 = 10,0/2,0$; относительное обжатие за проход 85 %)	295,9±1,1	255,7±1,2	0,86	10,3±0,10
Образец после симметричной прокатки	262,9±1,0	249,8±1,2	0,95	0,3±0,04
Исходный образец	191,7±0,9	141,4±0,8	0,74	6,2±0,08

В результате проведенных экспериментов прокатки образцов из алюминиевого сплава Д16 было выявлено, что увеличение отношения скоростей рабочих валков от 1 до 5 раз приводит к увеличению относительного удлинения образцов после разрыва. Так у образцов, полученных после симметричной прокатки относительное удлинение после разрыва снижалось до 0,3 %, у образцов, полученных после асимметричной прокатки относительное удлинение после

разрыва увеличивалось до 12,3 %. Для сравнения относительное удлинение исходного образца после разрыва составляло 6,2 %.

Результаты проведенных экспериментов прокатки алюминиевых образцов из сплава Д16 со смазкой с отношением скоростей рабочих валков равным 5 подтверждают увеличение относительного удлинения образцов после разрыва в 1,7 раз по сравнению с отожженным состоянием.

3.2.2 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава АМг6

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из АМг6 с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АМг6

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
24.03.2021–6	1,90	0,95	50	290,30	5,0/5,0	12	Образец разрушился
24.03.2021–13	1,90	0,73	62	268,10	8,0/4,0	132	Образец разрушился
24.03.2021–19	1,90	0,90	53	167,70	9,0/3,0	129	Образец разрушился
24.03.2021–25	1,90	0,80	58	211,30	8,0/2,0	121	Образец разрушился
24.03.2021–32	1,90	0,78	59	130,90	10,0/2,0	113	Образец сохранил целостность

При обычной прокатке термически не упрочняемого алюминиевого сплава АМг6 образец разрушался при попытке деформировать его до толщины 0,95 мм (обжатие 50 %). Увеличение отношения скоростей валков до $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ приводило к возможности увеличения обжатия образца до 59 % (конечная толщина 0,78 мм) без образования в нем трещин и разрывов. При обжатии 66 % происходило разрушение образцов.

Изменение усилия прокатки в зависимости от степени обжатия образцов алюминиевого сплава АМгб при различных отношениях скоростей рабочих валков представлено на рисунке 3.4.

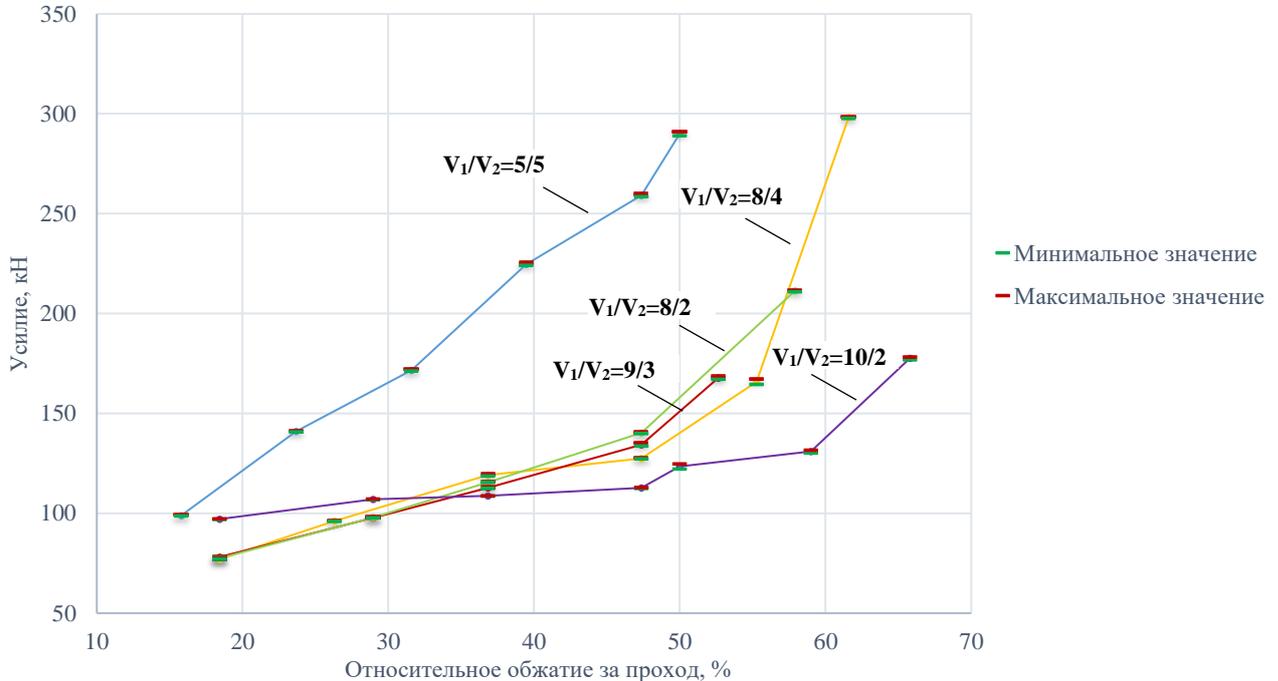


Рисунок 3.4 – Изменение усилия прокатки в зависимости от относительного обжатия образцов алюминиевого сплава АМгб при различных отношениях скоростей валков

Усилие прокатки при максимальной степени обжатия 50 % в симметричном режиме составило 290 кН. При увеличении отношения скоростей валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ наблюдается резкое снижение усилия прокатки более чем в 2,3 раза (125,5 кН при степени обжатия соответствующей степени обжатия в симметричном режиме).

Введение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 5 приводит к уменьшению значения усилия прокатки до 177,6 кН при относительном обжатии 66 %. Усилие прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ и относительном обжатии 59 %, при котором алюминиевая лента из сплава АМгб сохраняет целостность, составляет 130,9 кН.

Зависимости твердости алюминиевых лент АМгб, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлена на рисунке 3.5.

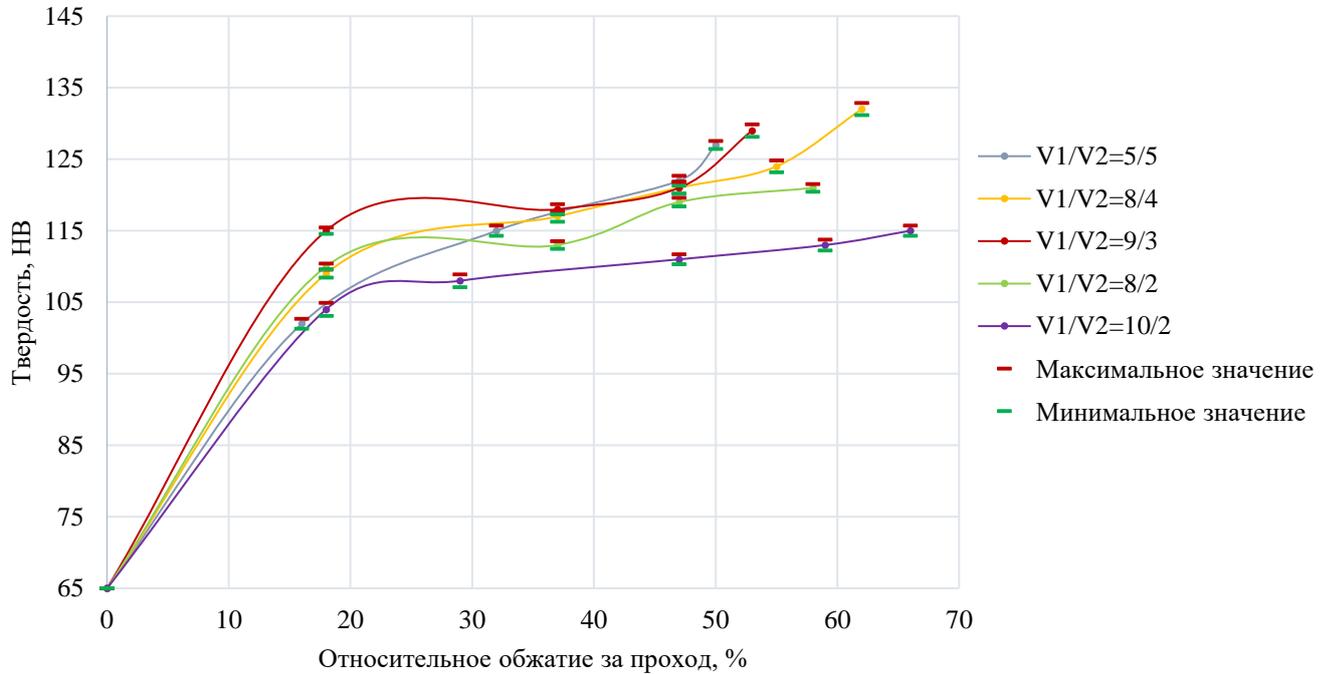


Рисунок 3.5 – Зависимости твердости лент из алюминиевого сплава АМгб от относительного обжатия

Согласно рисунку 3.5, наибольшее значение твердости 132 НВ было достигнуто в АМгб при соотношении скоростей $V_1/V_2= 8,0/4,0$ и обжатии 62 %, наименьшее значение твердости – 115 НВ было достигнуто при соотношении скоростей $V_1/V_2= 10,0/2,0$ и обжатии 66 % [43].

3.2.3 Экспериментальное исследование прокатки лент из алюминиевого сплава АД33

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из сплава АД33 с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 3.5.

При симметричной прокатке за один проход (с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2= 5,0/5,0$) образец термически упрочняемого алюминиевого

сплава АД33 разрушился при попытке деформировать его до толщины 1,2 мм (обжатие 40 %). Усилие прокатки при этом составило 353,9 кН.

Таблица 3.5 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АД 33

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
25.09.2021–5	2,00	1,20	40	353,9	5,0/5,0	116	Образец разрушился
25.09.2021–12	2,00	0,75	63	320,90	8,0/4,0	118	Образец сохранил целостность
25.09.2021–19	2,00	0,60	70	227,90	9,0/3,0	121	Образец сохранил целостность
25.09.2021–26	2,00	0,50	75	166,30	8,0/2,0	100	Образец сохранил целостность
25.09.2021–33	2,00	0,50	75	173,90	10,0/2,0	105	Образец сохранил целостность

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2 раз ($V_1/V_2 = 8,0/4,0$) приводит к увеличению обжатия до 63 % (конечная толщина 0,75 мм). Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2=8,0/2,0$ и $V_1/V_2=10,0/2,0$ приводит к обжатию 75 % (конечная толщина 0,5 мм в обоих случаях) [43].

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2=10,0/2,0$ приводит к снижению усилия прокатки, так при симметричном режиме усилие прокатки составило 353,9 кН при максимальной степени обжатия 40 %, в то время как при асимметричном режиме 173,9 кН при степени обжатия 75 %. Сравнение значений усилия прокатки при максимальной степени обжатия в симметричном режиме и такой же степени обжатия в асимметричном режиме при соотношении скоростей валков до $V_1/V_2= 10,0/2,0$ показывает снижение значение в 1,9 раза (184,8 кН).

Изменение усилия прокатки в зависимости от степени обжатия образцов алюминиевого сплава АД33 при различных отношениях скоростей валков

представлено на рисунке 3.6.

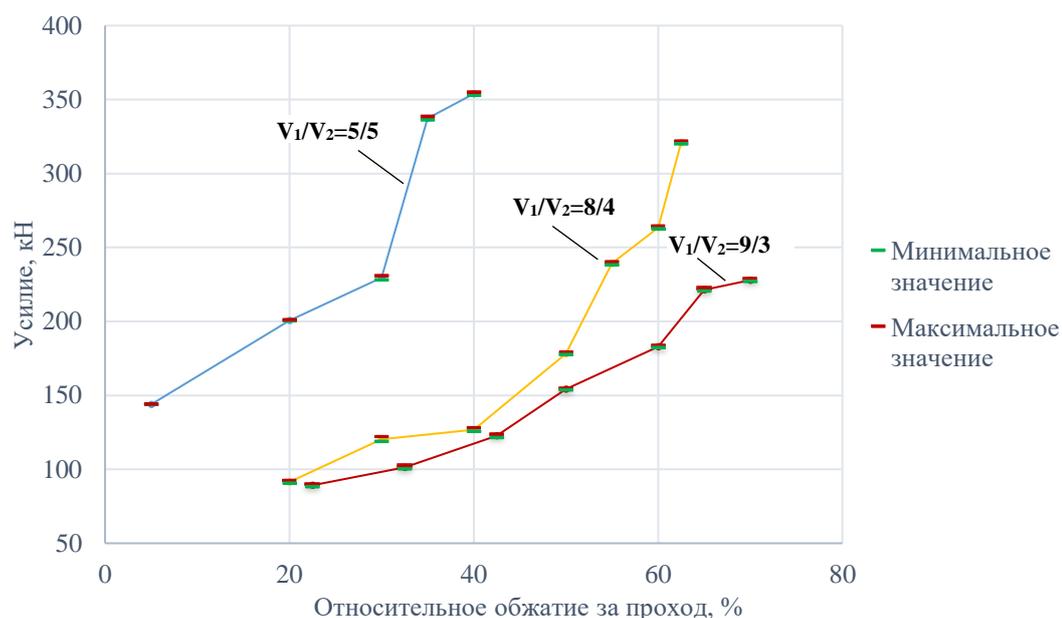


Рисунок 3.6 – Изменение усилия прокатки в зависимости от относительного обжатия образцов алюминиевого сплава АД33 при различных отношениях скоростей валков

Зависимости твердости алюминиевых лент АД33, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлены на рисунке 3.7.

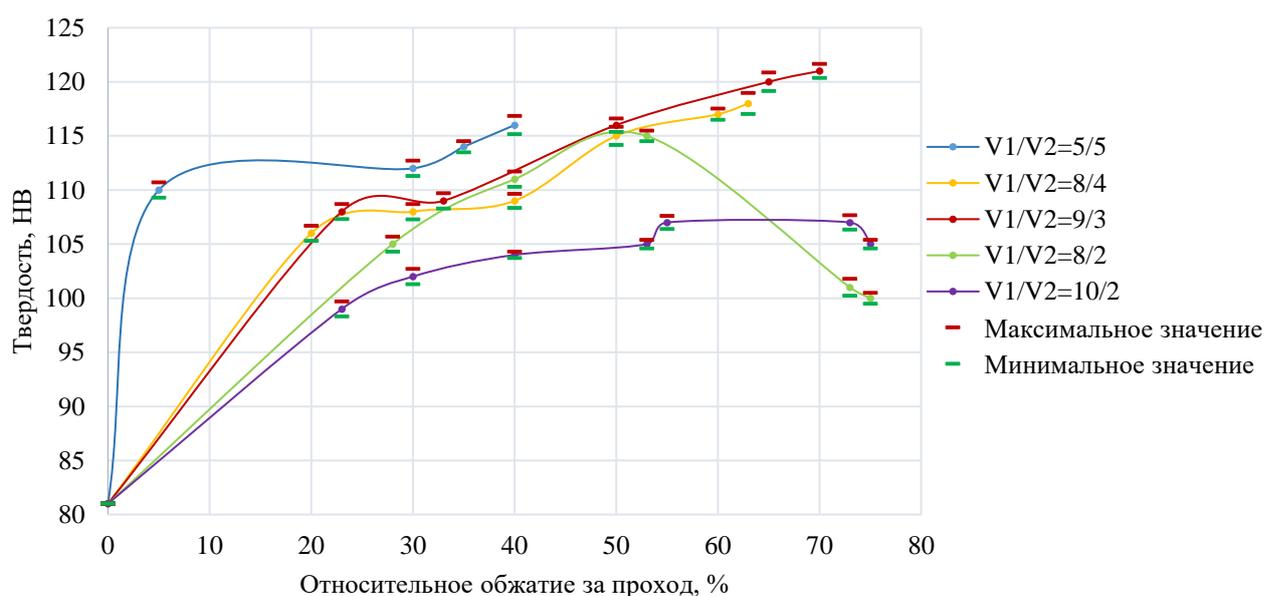


Рисунок 3.7 – Зависимость твердости алюминиевых лент из сплава АД33 от относительного обжатия

Наибольшее значение твердости 121 НВ было достигнуто в сплаве АД33 при соотношении скоростей $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ и обжатии 70 %, наименьшее значение твердости – 100 НВ было достигнуто при соотношении скоростей $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ и обжатии 75 % (рисунок 3.7).

Ведение асимметрии с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ приводит к получению алюминиевых лент из сплава АД33 со значениями твердости, НВ, ниже, чем у алюминиевых лент, полученных при симметричной прокатке.

Результаты проведенных экспериментов позволили выявить значительное снижение усилия прокатки алюминиевых сплавов при увеличении отношения скоростей рабочих валков. Кроме того, было показано увеличение технологической пластичности лент, полученных после асимметричной прокатки по сравнению с лентами, полученными при симметричной прокатке. Найдены значения твердости алюминиевых лент, полученных после прокатки, с различным отношением скоростей рабочих валков, на основании которых установлены зависимости твердости полученных алюминиевых лент от степени относительного обжатия за проход.

Заключение по результатам проведенных экспериментальных исследований получения алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки представлено в Приложении А.

3.2 Подтверждение адекватности компьютерного моделирования

В данном исследовании результаты компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 2D/3D, описанного во второй главе, сопоставлялись с результатами, полученными экспериментальным путем. Сравнение производилось по усилию и моментам прокатки на примере АМгб, АД33 и Д16.

Сопоставление результатов производилось при разном относительном обжатии в режимах симметричной и асимметричной прокатки.

Рассмотрим сопоставление результатов компьютерного моделирования и проведенных экспериментов симметричной прокатки АМгб при относительном обжатии 50 % (рисунок 3.8).

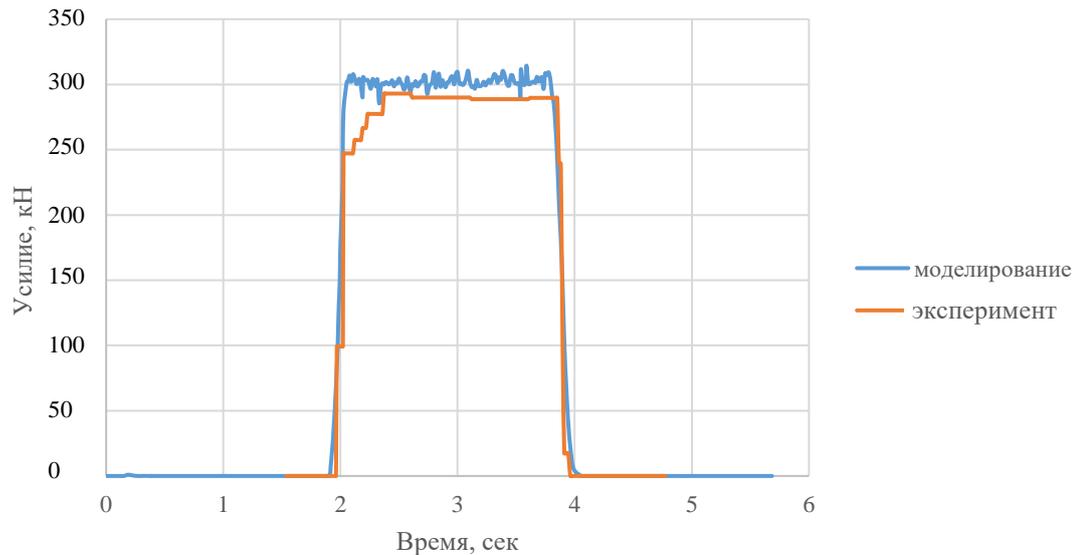


Рисунок 3.8 – Усилие симметричной прокатки лент из сплава АМгб с относительным обжатием 50 %, полученное при моделировании процесса и экспериментальным путем

Максимальное значение усилия, полученное при моделировании процесса симметричной прокатки в DEFORM 2D/3D составило 311,40 кН, максимальное значение усилия, полученное экспериментальным путем – 290,30 кН, следовательно, погрешность моделирования составила 7 %, что подтверждает адекватность данных, приведенных во второй главе, и данных, полученных экспериментальным путем.

Сопоставление данных, полученных при моделировании процесса асимметричной прокатки, и экспериментальных данных по асимметричной прокатке алюминиевых лент из сплава АМгб с относительным обжатием 66 % представлено на рисунке 3.9.

Максимальное значение усилия, полученное при моделировании процесса асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ составило 192,2 кН, максимальное значение усилия, полученное экспериментальным путем – 177,6 кН, следовательно, погрешность моделирования составила 7,6 %.

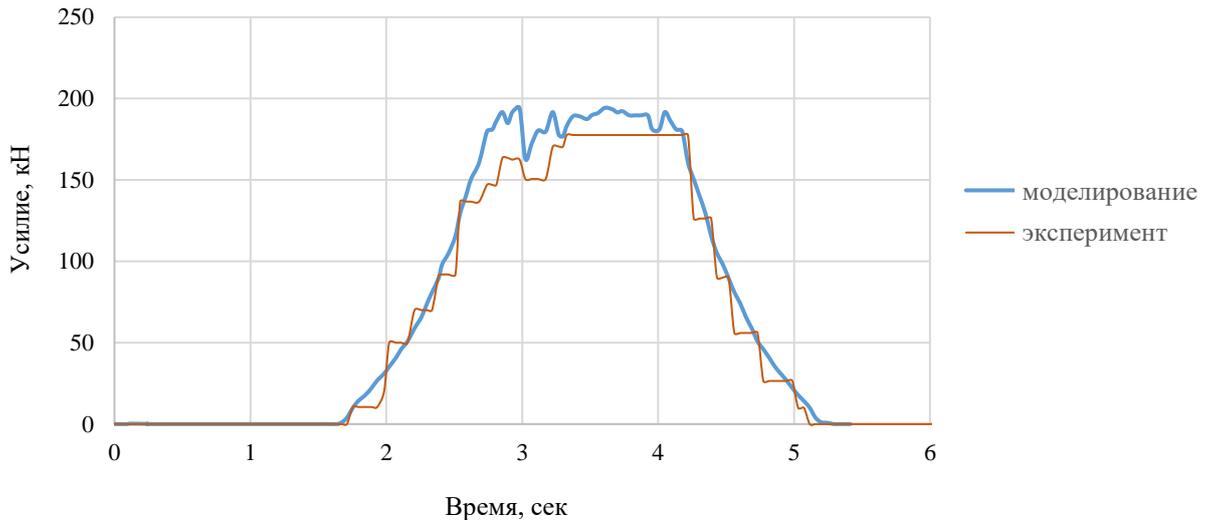


Рисунок 3.9 – Усилие асимметричной прокатки лент из сплава АМг6 с относительным обжатием 66 %, полученное при моделировании процесса и экспериментальным путем

Сопоставление значений усилия прокатки, полученных при моделировании процесса прокатки и значений усилия прокатки, полученных экспериментальным путем, представлено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Усилия прокатки, полученные при моделировании процесса и экспериментальным путем

Алюминиевый сплав	Отношение скоростей валков	Относительное обжатие, %	Усилие, кН, при моделировании процесса	Усилие, кН, при проведении эксперимента
АМг6	5	66	192,2	177,6
АД33	5	64	136,9	144,7
Д16	5	87	408,5	366,4

Анализ значений усилия прокатки, приведенных в таблице 3.6, при различных отношениях скоростей рабочих валков, полученных моделированием и экспериментальным путем, подтвердили адекватность моделирования с погрешностью, не превышающей 10 %.

Кроме усилия прокатки, в качестве параметра, способного подтвердить адекватность компьютерного моделирования, были выбраны моменты прокатки.

Сопоставление значений моментов прокатки, полученных при моделировании процесса и значений моментов прокатки, полученных экспериментальным путем, представлено в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Моменты прокатки, полученные при моделировании процесса и экспериментальным путем

Алюминиевый сплав	Отношение скоростей валков	Относительное обжатие, %	Моменты, кН·м, при моделировании процесса		Моменты, кН·м, при проведении эксперимента	
			Валок с большей скоростью	Валок с меньшей скоростью	Валок с большей скоростью	Валок с меньшей скоростью
Д16	5	87	11,24	2,21	9,56	2,16
АМг6	5	66	5,59	2,95	6,28	2,72
АМг6	1	50	1,68	1,68	1,64	1,64
АД33	1	40	1,46	1,46	1,39	1,39

Анализ значений моментов прокатки при различных отношениях скоростей рабочих валков, полученных моделированием и экспериментальным путем, подтвердили адекватность моделирования с погрешностью, не превышающей 15 %.

Компьютерное моделирование, выполненного во второй главе, позволило установить существенное снижение усилия асимметричной прокатки по сравнению с симметричной. Данные выводы были подтверждены экспериментальными данными. Так введение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков приводит к значительному снижению усилия прокатки в 3,2 раза (с 463,80 кН до 144,70 кН). Изменение усилия прокатки во

времени при симметричной и асимметричной прокатке алюминиевых лент из сплава Д16 с обжатием 48 % с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ представлено на рисунке 3.10.

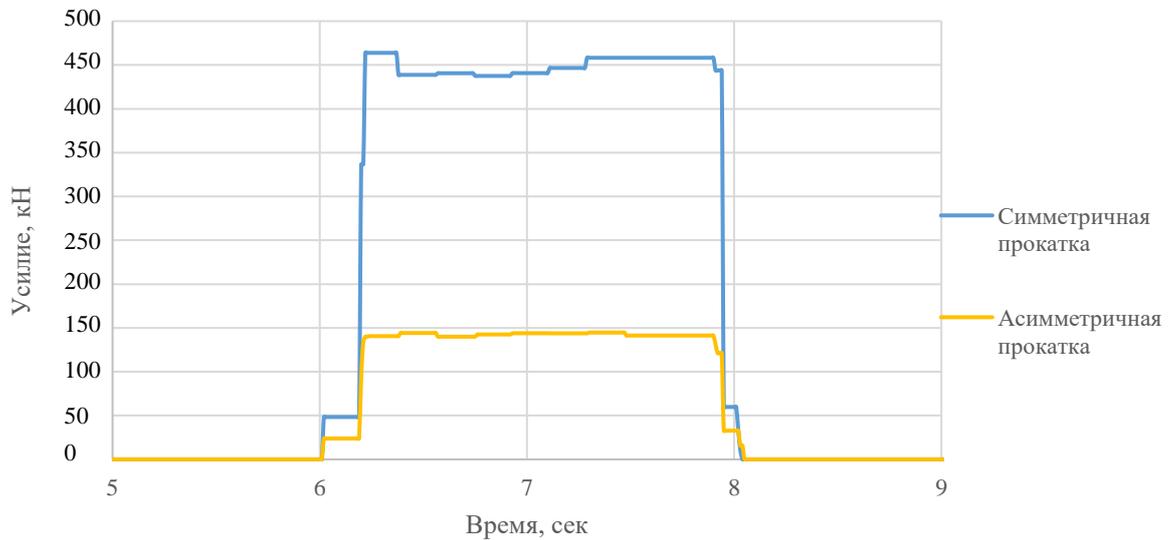


Рисунок 3.10 – Изменение усилия прокатки во времени при симметричной и асимметричной прокатке ленты из сплава Д16 с обжатием 48 % с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Таким образом, полученные во второй главе результаты компьютерного моделирования являются адекватными, что подтверждается сопоставлением значений усилия прокатки для алюминиевых сплавов, полученных при моделировании и экспериментальным путем.

3.3 Выводы по третьей главе

Проведение обширного экспериментального исследования по прокатке алюминиевых лент в режимах симметричного и асимметричного деформирования осуществлялось на уникальном лабораторно-промышленном стане дуо 400 асимметричной прокатки, изготовленного по техническому заданию ученых ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

В результате проведенных научных исследований:

1) Впервые экспериментально подтверждено, что увеличение отношения скоростей рабочих валков с 1,0 до 6,7 позволяет:

– существенно снизить усилие прокатки по сравнению с симметричным случаем: в 1,9 раз (для сплава АД33), в 2,3 раза (для сплава АМг6), в 3,2 раза (для сплава Д16);

– увеличить технологическую пластичность (увеличить относительное обжатие без разрушения образцов) для Д16 с 48 до 89 %, для АМг6 с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %;

– повысить после асимметричной прокатки ленты из сплава Д16 относительное удлинение образцов до 12,3 % по сравнению с 6,2 % при отожжённом состоянии.

2) Впервые экспериментально установлена возможность регулирования твердости различных лент из алюминиевых сплавов Д16 (от 67 до 122 НВ), АМг6 (от 102 до 132 НВ) и АД33 (от 99 до 121 НВ) в зависимости от технологических параметров прокатки (отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия).

3) Выполнена проверка адекватности компьютерного моделирования и экспериментальных данных путем сопоставления таких параметров как усилие и моменты прокатки при этом погрешность не превышала 10 и 15 % соответственно.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Анализ известных технологических режимов, выполненный в первой главе, компьютерное моделирование процесса асимметричной прокатке, приведенное во второй, а также экспериментальное исследование, представленное в третьей главе, позволили получить новые зависимости влияния параметров процесса асимметричной прокатки на энергосиловые параметры и механические свойства алюминиевых лент, а также выявили необходимость разработки способов повышения технологической пластичности.

В данной главе работы, посвященной уточнению и внедрению результатов исследования, были разработаны технологические схемы повышения технологической пластичности при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 на уникальной научной установке, лабораторно-промышленном стане дуо 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жиляева» (рисунок 4.1). В связи с тем, что твердость материала может быть охарактеризована как способность деформироваться под воздействием индентора, дополнительно были разработаны технологические режимы регулирования твердости алюминиевых лент при асимметричной прокатке (Приложения Б, В).

В состав работ, выполняемых при асимметричной прокатке алюминиевых лент на уникальной научной установке, входят подготовка образцов к прокатке; прокатка образцов; отделка; контроль качества.

Исходным материалом для производства алюминиевых лент толщиной, соответствующей требованиям ГОСТ 13726-97, служат заготовки из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33, химический состав которых был подтвержден атомно-эмиссионным спектральным анализом, представленным в третьей главе.

Следует отметить, что разработанные режимы повышения технологической пластичности и регулирования твердости алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке могут быть адаптированы на производственных объектах, имеющих прокатные станы с индивидуальным приводом рабочих валков.



Рисунок 4.1 – Общий вид конструкции стана дуо 400 с индивидуальным приводом рабочих валков

Представленные технологические решения приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия) (Приложения Г, Д). Представленная совокупность технологических схем, позволяющих существенно повысить технологическую пластичность, внедрена в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева» (Приложение Е). Разработанные технические решения применены в образовательном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (Приложение Ж).

4.1 Способы повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке

Во второй и третьей главе представленной работы показано, что использование асимметричной прокатки приводит, с одной стороны, к снижению усилия прокатки, а, с другой стороны, к повышению технологической пластичности металлов и сплавов.

По результатам проведенных экспериментальных исследований, описанных в третьей главе, для алюминиевого сплава Д16 показано, что при традиционной прокатке при относительной степени обжатия 48 % образец теряет пластические свойства и разрушается (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Разрушенный образец Д16 после симметричной прокатки с относительным обжатием 48 %

Экспериментальное исследование симметричной прокатки алюминиевого сплава АМг6 показало разрушение образца при относительной степени обжатия 50 %.

Алюминиевый сплав АД33 терял пластические свойства при попытке прокатать его в симметричном режиме с относительной степенью обжатия 40 %.

Образцы алюминиевого сплава АМг6 и АД33 после симметричной прокатки с относительным обжатием 50 % и 40 % соответственно имели вид, аналогичный разрушенному образцу алюминиевого сплава Д16, представленному на рисунке 4.2.

В связи с этим в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» для всех рассматриваемых в настоящем исследовании алюминиевых сплавов были разработаны технологические схемы производства алюминиевых лент на основе процессов асимметричной прокатки, позволяющие существенно сократить количество необходимых термических обработок и проходов при прокатке.

4.1.1 Совершенствование технологической схемы прокатки алюминиевого сплава Д16

Результаты проведенных экспериментов симметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 выявили возможность проведения относительного обжатия до 45 % с сохранением целостности получаемой ленты. В связи с этим, производство ленты из алюминиевого сплава Д16 толщиной 0,65 мм, соответствующей требованиям ГОСТ 13726-97, с помощью традиционной симметричной прокатки требует проведение четырех прокаток и четырех отжигов (рисунок 4.3).

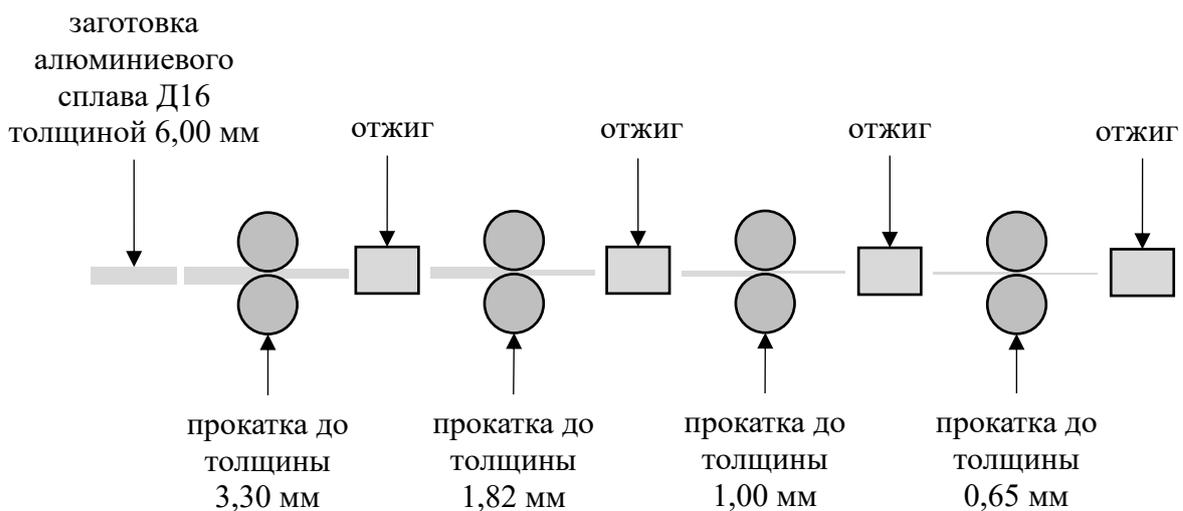


Рисунок 4.3 – Технологическая схема симметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм по представленной схеме симметричной прокатки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм при симметричной прокатке

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Симметричная прокатка первый проход	6,00	3,30	45	364,6
Симметричная прокатка второй проход	3,30	1,82	45	329,9
Симметричная прокатка третий проход	1,82	1,00	45	327,8
Симметричная прокатка четвертый проход	1,00	0,65	35	319,6

Из материалов, приведенных в третьей главе (таблица 3.2), следует, что увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2 приводит к увеличению единичного относительного обжатия до 55 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована следующим образом, представленным на рисунке 4.4.

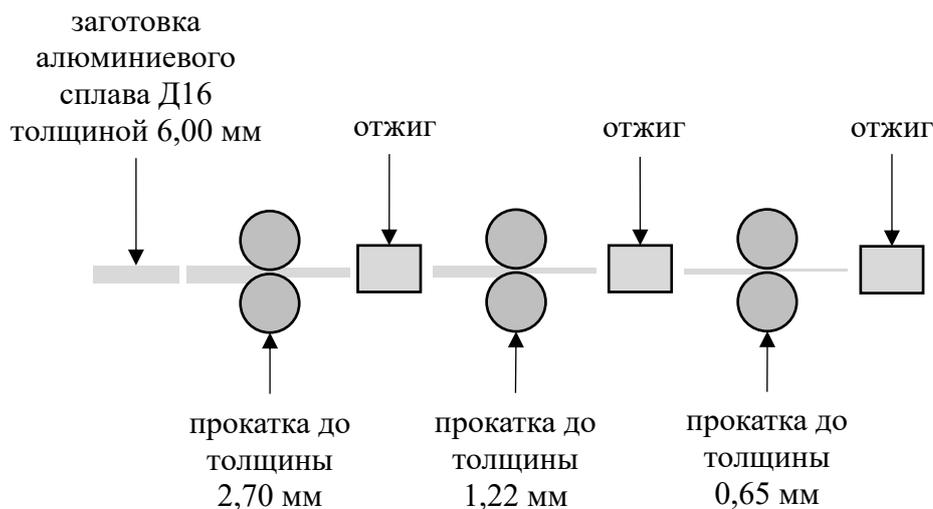


Рисунок 4.4 – Технологическая схема асимметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм по представленной схеме асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка первый проход	6,00	2,70	55	175,9
Асимметричная прокатка второй проход	2,70	1,22	55	198,8
Асимметричная прокатка третий проход	1,22	0,65	47	214,2

Предлагаемая технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ показывает возможность сокращения одной прокатки и отжига. Таким образом технологическая схема асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 для получения ленты толщиной 0,65 мм, представленная на рисунке 4.4, предполагает проведение трех прокаток и трех отжигов.

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 3 приводит к увеличению единичного относительного обжатия до 60 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована аналогичным образом, представленным на рисунке 4.4.

Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков до 4 приводит к увеличению относительного обжатия до 65 % с сохранением целостности получаемой ленты. В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована аналогичным образом, представленным на рисунке 4.4.

Предлагаемая технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ аналогично технологической схеме прокатки лент из алюминиевого сплава Д16 с отношениями

скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ и $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ показывает возможность сокращения одной прокатки и отжига.

Экспериментальные данные прокатки образцов алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$, приведенные в третьей главе (таблица 3.2), показывают возможность увеличения единичного относительного обжатия до 87 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована следующим образом, представленным на рисунке 4.5.

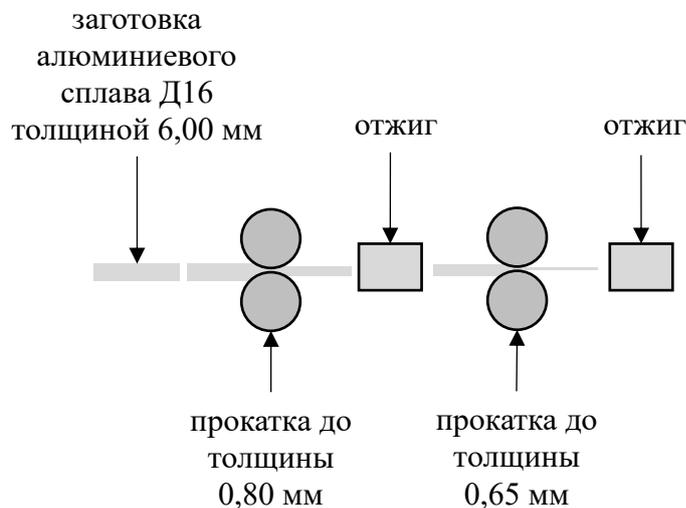


Рисунок 4.5 – Технологическая схема асимметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм по представленной схеме асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ приведены в таблице 4.3.

Предлагаемая технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ показывает возможность сокращения двух прокаток и двух отжигов. Таким образом технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

для получения ленты толщиной 0,65 мм, представленная на рисунке 4.5, предполагает проведение двух прокаток и двух отжигов.

Таблица 4.3 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка первый проход	6,00	0,80	87	366,4
Асимметричная прокатка второй проход	0,80	0,65	19	155,6

Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков 6,7 ($V_1/V_2 = 10,0/1,5$) приводит к увеличению относительного обжатия за проход до 89 % (конечная толщина 0,65 мм).

В этом случае, технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава Д16, может быть представлена в виде рисунка 4.6.

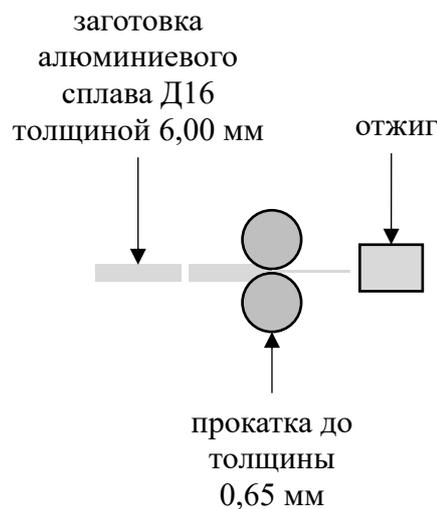


Рисунок 4.6 – Технологическая схема асимметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков

$$V_1/V_2 = 10,0/1,5$$

Технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/1,5$ позволяет сократить три прокатки и три отжига по сравнению с традиционной схемой прокатки, представленной на рисунке 4.2. Таким образом, введение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 6,7 позволяет получить алюминиевые ленты из сплава Д16 за один проход.

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм по представленной схеме асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/1,5$ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,65 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/1,5$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка первый проход	6,00	0,65	89	230,00

Предлагаемые способы совершенствования технологической схемы прокатки алюминиевого сплава Д16 за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков с 1 до 6,7 об./мин. позволяют существенно сократить количество выполняемых при прокатке технологических этапов (рисунки 4.3-4.5), что существенным образом сказывается не только на затратах, но и на времени осуществления процесса.

4.1.2 Совершенствование технологической схемы прокатки лент из алюминиевого сплава АМгб

Результаты проведенных экспериментов симметричной прокатки алюминиевого сплава АМгб выявили возможность проведения относительного обжатия до 47 % с сохранением целостности получаемой ленты. В связи с этим,

производство ленты из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 0,78 мм, соответствующей требованиям ГОСТ 13726-97, с помощью традиционной симметричной прокатки требует проведение двух прокаток и двух отжигов (рисунок 4.7).

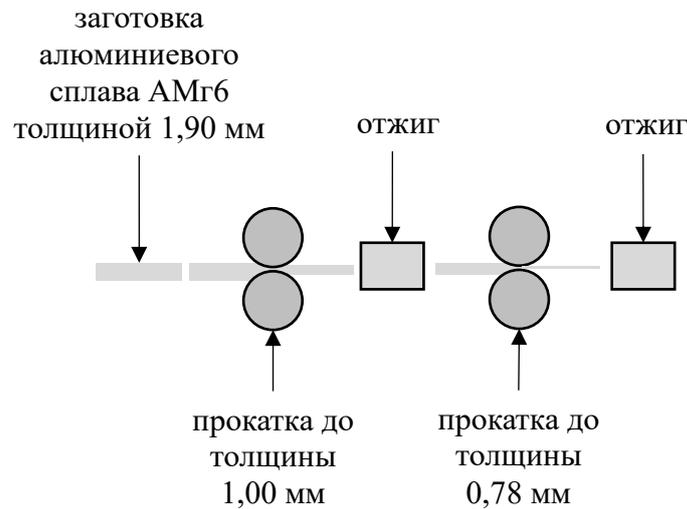


Рисунок 4.7 – Технологическая схема симметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава АМг6

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм по представленной схеме симметричной прокатки приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм при симметричной прокатке

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Симметричная прокатка первый проход	1,90	1,00	47	259,0
Симметричная прокатка второй проход	1,00	0,78	22	185,0

Из материалов, приведенных в третьей главе (таблица 3.4), следует, что значительное увеличение отношения скоростей рабочих валков до 5 приводит к

увеличению единичного относительного обжатия до 59 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована следующим образом, представленным на рисунке 4.8.

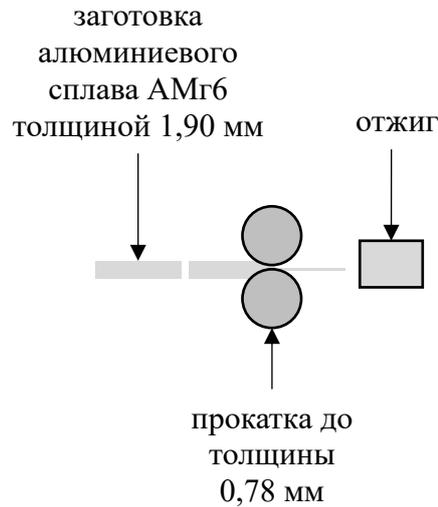


Рисунок 4.8 – Технологическая схема асимметричной прокатки лент алюминиевого сплава АМг6 с отношением скоростей рабочих валков

$$V_1/V_2 = 10,0/2,0$$

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка	1,90	0,78	59	130,90

Технологическая схема асимметричной прокатки алюминиевого сплава АМг6 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ позволяет сократить одну прокатку и отжиг по сравнению с традиционной схемой прокатки, представленной на рисунке 4.6. Таким образом, введение асимметрии за счет увеличения отношения скоростей рабочих валков до 5 позволяет получить алюминиевые ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм за один проход.

4.1.2 Совершенствование технологической схемы прокатки лент из алюминиевого сплава АД33

Результаты проведенных экспериментов симметричной прокатки алюминиевого сплава АД33 выявили возможность проведения относительного обжатия до 35 % с сохранением целостности получаемой ленты. В связи с этим, производство ленты из алюминиевого сплава АД33 толщиной 0,50 мм, соответствующей требованиям ГОСТ 13726-97, с помощью традиционной симметричной прокатки требует проведение четырех прокаток и четырех отжигов (рисунок 4.9).

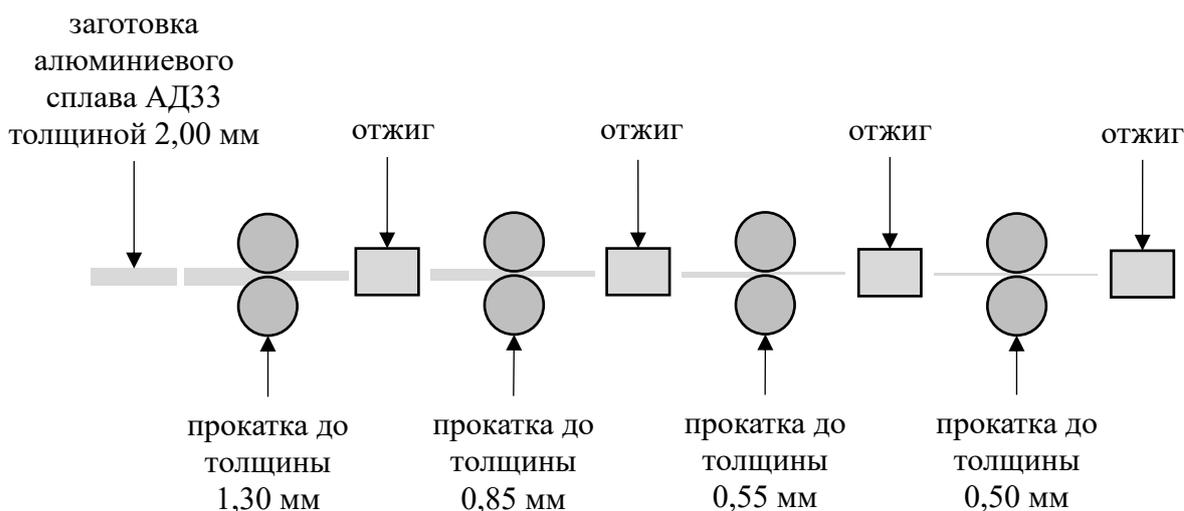


Рисунок 4.9 – Технологическая схема симметричной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМг6 толщиной 0,78 мм по представленной схеме симметричной прокатки приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АД33 толщиной 0,50 мм при симметричной прокатке

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Симметричная прокатка первый проход	2,00	1,30	35	336,5
Симметричная прокатка второй проход	1,30	0,85	35	271,6
Симметричная прокатка третий проход	0,85	0,55	35	274,8
Симметричная прокатка четвертый проход	0,55	0,50	9	150,6

Из материалов, приведенных в третьей главе (таблица 3.5), следует, что увеличение отношения скоростей рабочих валков до 2 приводит к увеличению единичного относительного обжатия до 63 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована следующим образом, представленным на рисунке 4.10.

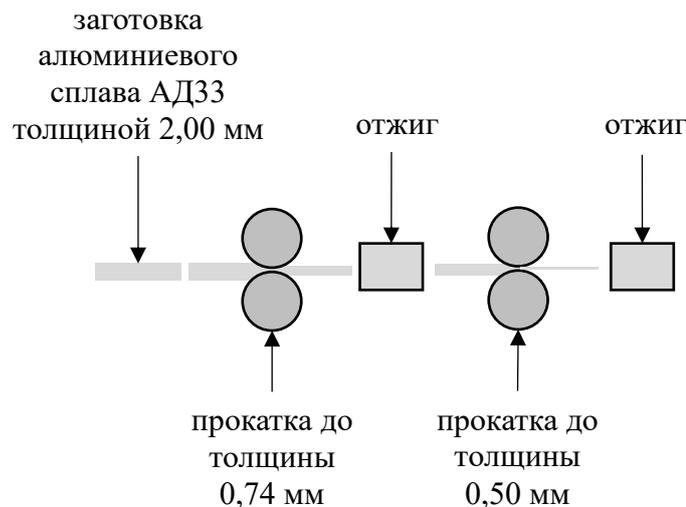


Рисунок 4.10 – Технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с отношением скоростей рабочих валков

$$V_1/V_2 = 8,0/4,0$$

Предлагаемая технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ показывает возможность сокращения двух прокаток и двух отжигов. Таким образом, технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 для получения ленты толщиной 0,50 мм, представленная на рисунке 4.10, предполагает проведение двух прокаток и двух отжигов.

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМгб толщиной 0,50 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АД33 толщиной 0,50 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка первый проход	2,00	0,74	63	320,0
Асимметричная прокатка второй проход	0,74	0,50	32	234,2

Увеличение отношения скоростей рабочих валков до 3 приводит к увеличению относительного обжатия до 70 % с сохранением целостности получаемой ленты. Технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ может быть представлена аналогично схеме на рисунке 4.10.

Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков до 4 показывают возможность увеличения единичного относительного обжатия до 75 % с сохранением целостности получаемой ленты.

В этом случае традиционная схема прокатки может быть скорректирована следующим образом, представленным на рисунке 4.11.

Предлагаемая технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ показывает

возможность сокращения трех прокаток и трех отжигов. Таким образом, технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33, представленная на рисунке 4.10, с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ позволяет получить алюминиевые ленты из сплава АД33 толщиной 0,50 мм за один проход.

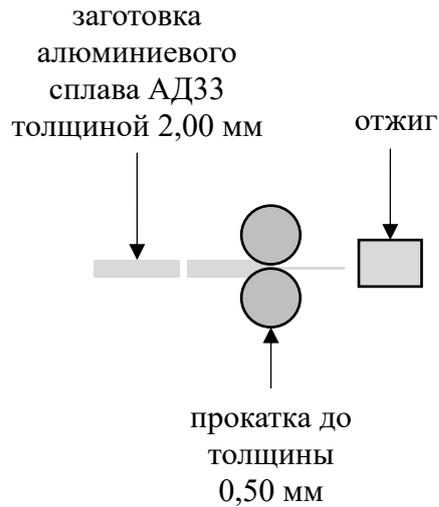


Рисунок 4.11 – Технологическая схема асимметричной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АМгб толщиной 0,50 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава АД33 толщиной 0,50 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка	2,00	0,50	75	166,30

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 были выявлены способы повышения технологической пластичности при асимметричной прокатке. Данные способы позволили исключить три прокатки и три отжига по сравнению с традиционной схемой прокатки алюминиевого сплава Д16 толщиной 6,00 мм, одну прокатку и одну стадию термической обработки при симметричной прокатке алюминиевого сплава АМг6 толщиной 1,90 мм, три прокатки и три отжига при традиционной прокатке алюминиевого сплава АД33 толщиной 2,00 мм при получении конечной толщины лент 0,65, 0,78 и 0,50 мм соответственно.

4.2 Технологический способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при асимметричной прокатке с возрастающей пластичностью

По результатам проведенных экспериментальных исследований асимметричной прокатки алюминиевых лент из сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$, описанных в третьей главе, установлено увеличение относительного удлинения образца алюминиевой ленты из сплава Д16 после разрыва в 2 раза по сравнению с исходным образцом. Механические свойства алюминиевых лент при прокатке с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 3.3.

Технологическая схема повышения пластичности алюминиевого сплава Д16 при асимметричной прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ с учетом данных таблицы 3.3, представлена на рисунке 4.12. Предлагаемая схема асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ предполагает сокращение трех прокаток и четырех отжигов по сравнению с традиционной схемой прокатки.

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,80 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10/2$ представлены в таблице 4.12.

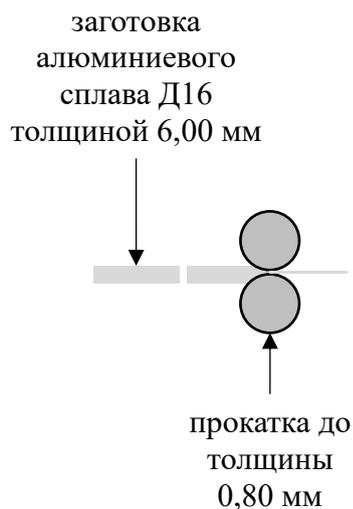


Рисунок 4.12 – Технологическая схема асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Таблица 4.10 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,80 мм при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН
	начальная	после прокатки		
Асимметричная прокатка первый проход	6,00	0,80	87	366,4

Предлагаемая технологическая схема прокатки алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ показывает возможность увеличения технологической пластичности в 2 раза. Полученные после прокатки алюминиевые ленты из сплава Д16 по предложенной технологической схеме (рисунок 4.12) соответствуют требованиям ГОСТ 13726-97, так как нормируемое значение относительного удлинения, δ , % составляет 12 % (не менее 10 % для лент из сплава Д16). Механические испытания выявили увеличение предела прочности (таблица 3.3) полученной ленты в 1,5 раза по сравнению с отожжённым состоянием.

4.3 Технологический способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки

Предлагаемые в четвертой главе технологические схемы повышения технологической пластичности алюминиевых лент из сплава Д16 при асимметричной прокатке направлены на получение алюминиевых лент толщиной 0,65 мм.

Представленная на рисунке 4.13 технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки позволяет получать алюминиевые ленты из сплава Д16 конечной толщиной 0,50 мм.

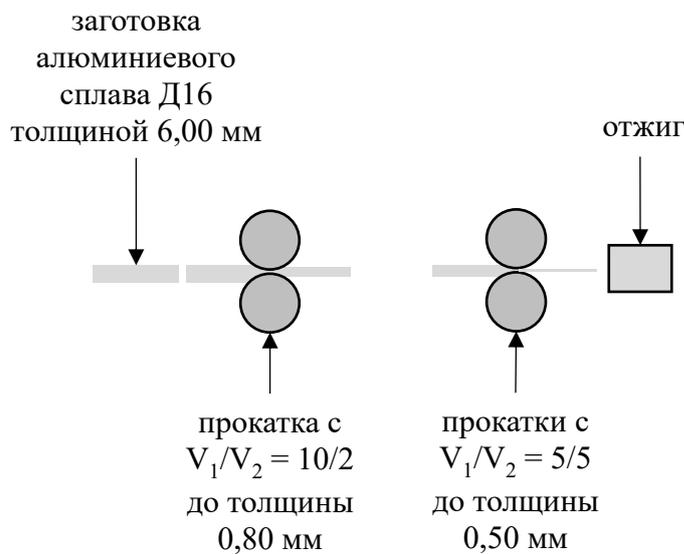


Рисунок 4.13 – Технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки алюминиевого сплава Д16

Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,50 мм по представленной схеме комбинирования асимметричной и симметричной прокатки приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Экспериментальные данные получения алюминиевой ленты из сплава Д16 толщиной 0,55 мм

Способ обработки	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Примечание
	начальная	после прокатки				
Асимметричная прокатка	6,00	0,80	87	366,4	10/2	Образец сохранил целостность
Симметричная прокатка	0,80	0,66	18	182,00	5/5	Образец сохранил целостность
Симметричная прокатка	0,66	0,50	24	200,00	5/5	Образец сохранил целостность
Симметричная прокатка	0,50	0,40	20	195,00	5/5	Образец разрушился

Предлагаемая технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки алюминиевого сплава Д16, показывает возможность получения лент из сплава Д16 толщиной 0,50 мм (относительное обжатие 92 %) за счет трех прокаток без проведения отжигов.

4.4 Технологические способы регулирования твердости лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке

Способы регулирования твердости лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 были утверждены в виде технологического регламента асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400 в соответствии с принятым в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» порядком. Технологический регламент представлен в Приложении Б.

Исходным материалом для асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 являются заготовки следующих размеров:

- толщина исходных заготовок 2,0-6,0 мм;

– ширина исходных заготовок до 300,0 мм.

Регулируя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие можно воздействовать на твердость и технологическую пластичность металлических лент из сплава Д16.

Зависимость технологических параметров режима прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент, НВ, представлена в таблице 4.12.

Максимальное значение относительного обжатия для отношения скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ составляет 58 %, для $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ составляет 67 %, для $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ – 68 %. После прокатки в режиме $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ и обжатии 87 % лента Д16 сохранила целостность.

Таблица 4.12 – Зависимость технологических параметров прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент Д16, НВ

Относительное обжатие, %	Коэффициент асимметрии (V_1/V_2)			
	2 (8/4)	3 (9/3)	4 (8/2)	5 (10/2)
От 10 до 20 включ.	От 95 до 100 включ.	От 92 до 93 включ.	Св. 67 до 68 включ.	Св. 69 до 76 включ.
Св. 20 до 30 включ.	Св. 100 до 107 включ.	Св. 93 до 94 включ.	Св. 68 до 74 включ.	Св. 76 до 81 включ.
Св. 30 до 40 включ.	Св. 107 до 117 включ.	Св. 94 до 97 включ.	Св. 74 до 90 включ.	Св. 81 до 82 включ.
Св. 40 до 50 включ.	Св. 117 до 122 включ.	Св. 97 до 105 включ.	Св. 90 до 101 включ.	Св. 82 до 86 включ.
Св. 50 до 60 включ.	От 122 до 118 включ.	От 105 до 98 включ.	Св. 101 до 103 включ. и от 103 до 98 включ.	Св. 86 до 87 включ. и от 87 до 84 включ.
Св. 60 до 70 включ.	–	От 98 до 86	От 98 до 88 включ.	От 84 до 80 включ.
Св. 70 до 80 включ.	–	–	–	От 80 до 75 включ.
Св. 80 до 90 включ.	–	–	–	От 75 до 73 включ.

Таким образом, зная необходимое значение твердости ленты из сплава Д16 возможно определить технологические параметры асимметричного режима.

При увеличении отношения скоростей рабочих валков с 1 до 2 твердость существенно возрастает при различных степенях обжатия. Максимальное увеличение значения твердости более чем в 1,2 раза (122 НВ) достигается при 47 % обжатия. При обжатии более 47 % твердость снижается до 118 НВ.

При увеличении отношения скоростей рабочих валков с 1 до 3 наблюдается возрастание твердости до 93 НВ при обжатиях от 10 до 20 %. При обжатиях от 30 до 48 % значения твердости практически идентичны с симметричным режимом. Максимальное значение твердости 105 НВ достигается при степени обжатия 55 %. При обжатиях от 55 до 67 % наблюдается снижение значения твердости до 86 НВ.

Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков с 4 до 5 не приводит к увеличению твердости по сравнению с симметричным режимом.

При увеличении отношения скоростей рабочих валков с 1 до 4 наблюдается возрастание твердости до 103 НВ при обжатиях от 10 до 55 %. При степенях обжатия более 55 % наблюдается снижение твердости до 88 НВ.

При увеличении отношения скоростей рабочих валков с 1 до 5 наблюдается возрастание твердости до 87 НВ при обжатиях от 10 до 53 %. При степенях обжатия более 53 % наблюдается снижение твердости до 73 НВ.

На основе данных полученных экспериментальным путем, выявлены режимы прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$, позволяющие получать ленты Д16, обладающие пониженным значением твердости при различных степенях обжатия, режим прокатки с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$, позволяющий получать ленты Д16, обладающие повышенной твердостью при различных степенях обжатия.

При значительной степени обжатия (более 60 %) и большой разностью скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ помимо больших сдвиговых деформаций происходит дополнительный разогрев металла, при котором начинаются термически активационные процессы разупрочнения

(процессы рекристаллизации), обеспечивающие повышение пластичных характеристик [154].

Исходным материалом для асимметричной прокатки алюминиевого сплава АМгб являются заготовки следующих размеров:

- толщина исходных заготовок 1,9-3,0 мм;
- ширина исходных заготовок до 300,0 мм;

Регулируя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие можно воздействовать на твердость и технологическую пластичность металлических лент из сплава АМгб.

Зависимость технологических параметров режима прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент, НВ, представлена в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Зависимость технологических параметров режима прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент АМгб, НВ

Относительное обжатие, %	Коэффициент асимметрии (V_1/V_2)			
	2 (8/4)	3 (9/3)	4 (8/2)	5 (10/2)
От 10 до 20 включ.	От 109 до 110 включ.	От 115 до 116 включ.	Св. 110 до 111 включ.	Св. 104 до 105 включ.
Св. 20 до 30 включ.	Св. 110 до 114 включ.	Св. 116 до 117 включ.	Св. 111 до 112 включ.	Св. 105 до 108 включ.
Св. 30 до 40 включ.	Св. 114 до 118 включ.	Св. 117 до 119 включ.	Св. 112 до 114 включ.	Св. 108 до 110 включ.
Св. 40 до 50 включ.	Св. 118 до 122 включ.	Св. 119 до 124 включ.	Св. 114 до 120 включ.	Св. 110 до 112 включ.
Св. 50 до 60 включ.	Св. 122 до 129 включ.	Св. 124 до 129 включ.	Св. 120 до 121 включ.	Св. 112 до 114 включ.
Св. 60 до 70 включ.	Св. 129 до 132 включ.	–	–	Св. 114 до 115 включ.
Св. 70 до 80 включ.	–	–	–	–
Св. 80 до 90 включ.	–	–	–	–

Максимальное значение относительного обжатия для отношения скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ составляет 62 %, для $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ составляет 53 %, для $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ – 58 %, для $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ – 66 %.

При степени обжатия от 10 до 20 % наблюдается увеличение значения твердости при увеличении отношения скоростей рабочих валков. Максимальное значение твердости 116 НВ получено при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 3,0/9,0$.

При степени обжатия от 20 до 30 % твердость увеличивается при увеличении отношения скоростей рабочих валков от 1 до 3.

При степени обжатия от 27 % и более наблюдается снижение значения твердости при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$. Максимальное снижение твердости в 1,1 раза наблюдается при обжатии 55 % и отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$.

При степени обжатия от 37 до 50 % при увеличении отношения скоростей рабочих валков от 1 до 3 значения твердости практически идентичны.

При обжатии от 47 до 58 % наблюдается снижение значения твердости при увеличении отношения скоростей рабочих валков от 1 до 2. Максимальное значение твердости 132 НВ достигнуто при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$ и обжатии 62 %.

Исходным материалом для асимметричной прокатки алюминиевого сплава АД33 являются заготовки следующих размеров:

- толщина исходных заготовок 2,0-4,0 мм;
- ширина исходных заготовок до 300,0 мм;

Регулируя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие можно воздействовать на твердость и технологическую пластичность металлических лент из сплава АД33.

Зависимость технологических параметров режима прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент, НВ, представлена в таблице 4.14.

Максимальное значение относительного обжатия для отношения скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8/4$ составляет 63 %, для $V_1/V_2 = 9,0/3,0$ составляет 70 %, для $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ составляет 75 %, для $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ – 75 %.

Таблица 4.14 – Зависимость технологических параметров режима прокатки и получаемой твердости алюминиевых лент АД33, НВ

Относительное обжатие, %	Коэффициент асимметрии (V_1/V_2)			
	2 (8/4)	3 (9/3)	4 (8/2)	5 (10/2)
Св. 20 до 30 включ.	Св. 106 до 108 включ.	Св. 108 до 108 включ.	Св. 103 до 106 включ.	Св. 99 до 102 включ.
Св. 30 до 40 включ.	Св. 108 до 109 включ.	Св. 108 до 112 включ.	Св. 106 до 111 включ.	Св. 102 до 104 включ.
Св. 40 до 50 включ.	Св. 109 до 115 включ.	Св. 112 до 116 включ.	Св. 111 до 115 включ.	Св. 104 до 105 включ.
Св. 50 до 60 включ.	Св. 115 до 117 включ.	Св. 116 до 119 включ.	От 115 до 111 включ.	Св. 105 до 107 включ.
Св. 60 до 70 включ.	Св. 117 до 118 включ.	Св. 119 до 121 включ.	От 111 до 103 включ.	Св. 107 до 107 включ.
Св. 70 до 80 включ.	–	–	От 103 до 100 включ.	От 107 до 105 включ.
Св. 80 до 90 включ.	–	–	–	–

При значительной степени обжатия (более 60 %) и большим отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ помимо больших сдвиговых деформаций происходит дополнительный разогрев металла, при котором начинаются термически активационные процессы разупрочнения (процессы рекристаллизации), обеспечивающие повышение пластичных характеристик (таблица 4.10).

При степени обжатия от 5 до 40 % наблюдается снижение значения твердости при увеличении отношения скоростей рабочих валков от 1 до 5. Минимальное значение твердости 99 НВ получено при 23 % обжатия при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$.

При степени обжатия более 50 % наблюдается увеличение значения твердости до 121 НВ при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 9,0/3,0$.

При степени обжатия более 53 % наблюдается увеличение значения твердости до 118 НВ при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/4,0$.

При отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ наблюдается снижение значения твердости с максимального значения 115 НВ при обжати более 53 % до 100 НВ при обжати 75 %.

При различных степенях обжатия наблюдается снижение значения твердости при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$, и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$.

При значительных степенях обжатия (более 70 %) и большим отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 8,0/2,0$ и $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ помимо больших сдвиговых деформаций происходит дополнительный разогрев металла, при котором начинаются термически активационные процессы разупрочнения (процессы рекристаллизации), обеспечивающие повышение пластичных характеристик.

Таким образом, изменяя отношение скоростей рабочих валков и относительное обжатие за проход возможно регулировать твердость и технологическую пластичность металлических лент из сплавов Д16, АМг6 и АД33.

4.5 Выводы по четвертой главе

В данной главе описаны новые технические решения и технологические схемы получения металлических лент с градиентной структурой на стане дуо 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева».

В результате проведенных научных исследований:

1) Разработаны технологические схемы повышения технологической пластичности лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке. Данные способы позволили исключить три прокатки и три отжига по сравнению с традиционной схемой прокатки алюминиевого сплава Д16 толщиной 6,00 мм, одну прокатку и одну стадию термической обработки при симметричной прокатке алюминиевого сплава АМг6 толщиной 1,90 мм, три прокатки и три отжига при традиционной прокатке алюминиевого сплава АД33

толщиной 2,00 мм для получения лент конечной толщиной 0,65, 0,78 и 0,50 мм соответственно.

2) Разработана технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ с возрастающей пластичностью. Схема приводит к увеличению технологической пластичности в 2 раза ($\delta = 12,3 \%$) полученной алюминиевой ленты по сравнению с исходным образцом. Полученные после прокатки алюминиевые ленты из сплава Д16 по предложенной технологической схеме соответствуют требованиям ГОСТ 13726-97, так как нормируемое значение относительного удлинения (не менее 10 % для лент из сплава Д16). Данная схема предполагает исключение трех прокаток и четырех отжигов по сравнению с традиционной схемой прокатки алюминиевого сплава Д16 толщиной 6,00 мм.

3) Разработана технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки. Предлагаемая технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки алюминиевого сплава Д16, показывает возможность получения лент из сплава Д16 толщиной 0,50 мм (относительное обжатие 92 %) за счет трех прокаток без проведения отжигов.

4) Разработаны способы регулирования твердости лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 в зависимости от отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия за проход, утвержденные технологическим регламентом. Технологический регламент асимметричной прокатки алюминиевых лент на уникальной научной установке стане дуо 400 регламентирует прокатку заготовок алюминиевого сплава Д16 следующих размеров: толщиной от 2,0 до 5,0 мм; шириной до 300,0 мм; алюминиевого сплава АМг6 следующих размеров: толщиной от 1,9 до 3,0 мм; шириной до 300,0 мм; алюминиевого сплава АД33 следующих размеров: толщиной от 2,0 до 4,0 мм; шириной до 300,0 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе развивается подход, разработанный на кафедре технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», по использованию асимметричной прокатки металлических лент. В частности,

1) Впервые показано, что истинная деформация ϵ для алюминиевых лент достигает экстремальных значений при отношении скоростей рабочих валков равном $(0,76 \dots 0,96) \cdot h_0/h_1$, где h_0 и h_1 – входная и выходная толщины листа.

2) Впервые показано, что увеличение отношения скоростей рабочих валков с 1,0 до 6,7 позволяет:

- существенно снизить усилие прокатки по сравнению с симметричным случаем: в 1,9 раз (для сплава АД33), в 2,3 раза (для сплава АМг6), в 3,2 раза (для сплава Д16);

- увеличить технологическую пластичность (увеличить относительное обжатие без разрушения образцов) для Д16 с 48 до 89 %, для АМг6 с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %;

- повысить после асимметричной прокатки ленты из сплава Д16 относительное удлинение образцов до 12,3 % по сравнению с 6,2 % при отожжённом состоянии.

3) Впервые установлена возможность регулирования твердости различных лент из алюминиевых сплавов Д16 (от 67 до 122 НВ), АМг6 (от 102 до 132 НВ) и АД33 (от 99 до 121 НВ) в зависимости от технологических параметров прокатки (отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия).

4) Предложены новые технологические схемы производства алюминиевых лент с повышенной технологической пластичностью, позволяющие исключить от одной до трех прокаток и от одного до трех отжигов.

5) Предложен способ производства алюминиевых лент с возрастающей пластичностью, предполагающий сокращение трех прокаток и четырех отжигов.

6) Разработан способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки.

7) Разработанные новые технические и технологические решения производства алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане дуо 400 приняты к использованию в ООО «ЧерметИнформСистемы», Институте информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Представленная совокупность технологических схем, позволяющих существенно повысить технологическую пластичность, а также технологический регламент асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 на стане дуо 400 внедрены в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева». Разработанные технические решения применены в образовательном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года» [Электронный источник] / [https://www.garant.ru/products /ipo/prime/doc/70595824 /#review](https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/#review) (дата обращения 01.03.2022).
2. Приказ Минпромторга России от 14.07.2021 № 2591 (ред. от 21.10.2021) «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли цветной металлургии Российской Федерации и о признании утратившим силу приказа Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 25 апреля 2018 г. № 1665 «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли цветной металлургии Российской Федерации» [Электронный источник] / http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421506/ (дата обращения 12.06.2022).
3. Самохвалов В.Н. Научные основы технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / В.Н. Самохвалов. – Электрон. текст. и граф. дан. (3,5 Мб). – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 148 с.
4. Салганик В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения / В.М. Салганик, А.М. Песин. – М.: МИСИС, 1997. – 192 с.
5. Песин, А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2020. – Т. 20. № 3. – с. 81-96.
6. Ji, Y.H. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes / Y.H. Ji, J.J. Park // Materials Science and Engineering: A. 2009. V. 499. No 1. P. 14-17.

7. Ji, Y.H. Finite element analysis of severe deformation in mg-3al-1zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio / Y.H. Ji, J.J. Park, W.J. Kim // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. V. 454. P. 570-574.
8. Cui, Q. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling / Q. Cui, K. Ohori // *Materials Science and Technology*. 2000. V. 16. P. 1095-1101.
9. Zuo, F.-Q. Shear deformation and grain refinement in pure al by asymmetric rolling / F.-Q. Zuo, J.-H. Jiang, A.-D. Shan, J.-M. Fang, X.-Yao Zhang. // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2008. – V. 18. –No 4. – p. 774-777.
10. Jiang, J. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling / J. Jiang, Yi Ding, F. Zuo, A. Shan // *Scripta Materialia*. – 2009. – V. 60. – No 10. – p. 905-908.
11. Lee, J.-K. Texture control and grain refinement of aa1050 al alloy sheets by asymmetric rolling / J.-K. Lee, D. N. Lee // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2008. – V. 50. – No. 5. – p. 869-887.
12. Kim, W.J. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling / W.J. Kim, J.B. Lee, W.Y. Kim // *Scripta Materialia*. – 2007. – V. 56. – p. 309-312.
13. Chang, L.L. Microstructure and mechanical properties of am31 magnesium alloys processed by differential speed rolling / L.L. Chang, J.H. Cho, S.B. Kang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – V. 211. – No 9. – p. 1527-1533.
14. Kim, W.J. Exceptionally high strength in mg-3al-1zn alloy processed by high-ratio differential speed rolling / W.J. Kim, Y.G. Lee, M.J. Lee, Wang J.Y., Y.B. Park // *Scripta Materialia*. – 2011. – V. 65. – No 12. – p. 1105-1108.
15. Kim, W.J. Microstructure and mechanical properties of pure Ti processed by high-ratio differential speed rolling at room temperature / W.J. Kim, S.J. Yoo, J.B. Lee // *Scripta Materialia*. – 2010. – V. 62. – No 7. – p.. 451-454.
16. Li, Y.H. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio / Y.H .Li, J.J. Park, W.J. Kim // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – V. 454. – p. 570-574.

17. Lorentz. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling / Lorentz, Y. G. Ko // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. – V. 536S. – p. S122-S125.

18. Ding, Yi. Microstructures and mechanical properties of commercial purity iron processed by asymmetric rolling / Yi Ding, J. Jiang, A. Shan. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – V. 509. – No. 1-2. – p. 76-80.

19. Pesin, A. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 622-623. – p. 929-935.

20. Zuo, F. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling / F. Zuo, J. Jiang, A. Shan // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2008. – V. 18. – p. 774-777.

21. Bobor, K. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling / K. Bobor, Z. Hegedus, J. Gubicza, I. Barkai, P. Pekker, G. Krallics // *Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering*. – 2012. – V. 56. – p. 111-115.

22. ГОСТ 21631-76 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия – М.: Стандартинформ, 2008. – 30 с.

23. ГОСТ 17232-99 Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 15 с.

24. ГОСТ 618-2014 Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

25. ГОСТ 745-2014 Фольга алюминиевая для упаковки. Технические условия – М.: Стандартинформ, 2015. – 23 с.

26. ГОСТ 25905-2018. Фольга алюминиевая для конденсаторов. Технические условия – М.: Стандартинформ, 2018. – 23 с.

27. ГОСТ 13726-97 Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия – М.: Стандартинформ, 1999. – 21 с.

28. Pustovoytov, D. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) rolling of light alloys: A Review / D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon // *Metals* 2021. – 11 (956). – p. 1-46.
29. Песин, А.М. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2015. – №4. с. 75-81.
30. Sverdlik, M. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling / M. Sverdlik, A. Pesin, D. Pustovoytov, A. Perekhozhikh // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Т. 742. – p. 476-481.
31. Пустовойтов, Д.О. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.А. Перехожих, М.К. Свердлик // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 1 (41). – с. 65-68.
32. Pesin, A. Finite element modeling of shear strain in asymmetric and symmetric rolling in multi roll calibers / A. Pesin, M. Chukin, A. Korchunov, D. Pustovoytov // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 81. – p. 2469-2474.
33. Pesin, A. Finite Element Modeling of Shear Strain in Rolling with Velocity Asymmetry in Multi-Roll Calibers / A. Pesin, M. Chukin, A. Korchunov, D. Pustovoytov // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 622-623. – p. 912-918.
34. Pesin, A. Numerical study of grain evolution and dislocation density during asymmetric rolling of aluminum alloy 7075 / A. Pesin, A. Korchunov, D. Pustovoytov // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – p. 162-166.
35. Песин, А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Песин. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2003. – 395 с.

36. Kim, W.J. Synthesis of ultra high strength Al-Mg-Si alloy sheets by differential speed rolling / W.J. Kim, J.Y. Wang, S.O. Choi, H.J. Choi, H.T. Sohn // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – 520. – p. 23-28.

37. Yu, H.L. Asymmetric cryorolling for fabrication of nanostructural aluminum sheets / H.L. Yu, C. Lu, K. Tieu, X.H. Liu, Y. Sun, Q.B. Yu, C. Kong, // Sci. Rep. 2012. – 2 (772). – p. 1-4.

38. Pustovoytov, D. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review / D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon // Metals 2021. – 11 (956). – p. 1-46.

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

40. Елагин, В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – №9. – с. 3-11.

41. Давыдов, В.Г. О некоторых актуальных проблемах разработки алюминиевых сплавов и технологий для авиакосмического применения // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 4. С. 32-36.

42. Антипов, В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu-сплавы и легкие Al-Li-сплавы / В.В. Антипов, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, Р.О. Вахромов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – №9. – с. 27-33.

43. Песин, А.М. Исследование влияния соотношения скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке на твердость алюминиевых сплавов Д16 и АМг6 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.Е. Кожемякина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции. Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), 2022. – с. 233.

44. Песин, А.М. Новые интересные результаты, полученные на новом прокатном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории Механики

градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, И.А. Песин, Л.В. Носов, А.Е. Кожемякина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции. Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), 2022. – с. 219.

45. Равлюк С. Рынок алюминия в России и в мире: первичный и вторичный алюминий тенденции и перспективы [Электронный ресурс]: презентация / С. Равлюк. – Москва, ОК РУСАЛ, 2020. – 17 слайдов.

46. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки – М.: Стандартинформ, 2019. – 35 с.

47. Патент РФ № 2363755 МПК В21В 1/22. Способ получения листового проката из алюминиевых сплавов. Авторы: Гаврилов Н.В., Гущина Н.В., Можаровский С.М., Овчинников В.В., Филиппов А.В., Школьников А.Р. // Заявка: 2006143709/02, 08.12.2006. Опубликовано: 10.08.2009. Бюл. №22. Патентообладатель: ОАО «Каменск-уральский металлургический завод».

48. Патент SU 386 878 А1. Способ тепловлажностной обработки изделий. Автор: Поперечный И.В. // Заявка: 1664064, 31.05.1971. Опубликовано: 21.07.1973. Бюл. №27. Патентообладатель: Научно-исследовательский институт строительных конструкций.

49. Патент SU 1126625 А1. Способ обработки заготовок из алюминиевых сплавов. Авторы: Кайбышев О.А., Рабинович М.Х., Трифонов В.Г., Нечаев С.С. // Заявка: 3277890, 17.04.1981. Опубликовано: 30.11.1984. Бюл. №44. Патентообладатель: Уфимский ордена Ленина авиационный институт им. Орджоникидзе.

50. Патент SU 850235 А1. Способ прокатки сплавов системы алюминий-магний. Авторы: Злотин Л.Б., Сильвестров К.Г., Оржеховский В.Л., Головчанов Е.Г., Лапис А.В., Свирепчук В.Д., Слесарев В.В., Коганов Л.М., Копнов В.И., Белоус Н.В. // Заявка: 2809624/22-02, 17.08.1979. Опубликовано: 30.07.1981. Бюл.

№28. Патентообладатель: Государственный научно-исследовательский и проектный институт сплавов и обработки цветных металлов.

51. Wronski, S. Three-dimensional analysis of asymmetric rolling with flat and inclined entry / S. Wronski, K. Wierzbanowski; M. Wronski, B. Vacroix // Arch. Metall. Mater. – 2014. – 59. – p. 585–591.

52. Gao, H. Analysis of asymmetrical cold rolling with varying coefficients of friction / H. Gao, S.C. Ramalingam, G.C. Barber, G. Chen // J. Mater. Process. Technol. – 2002. – 124. – p. 178–182.

53. Utsunomiya, H. Improvement in the r-value of aluminum sheets by differential-friction rolling / H. Utsunomiya, T. Ueno, T. Sakai // Scr. Mater. – 2007. – 57. – p. 1109–1112.

54. Potapkin, V.F.; Fedorinov, V.A.; Morozov, I.A.; Ravich, A.S. Klet' Dlya Deformatsii Metalla Mezhdru Nepodvizhnym i Rabochim Privodnymi Valkami [Stand for Metal Deformation Between Stationary and Driven Work Rolls]. USSR Patent 871855, 30 September 1979. (In Russian)

55. Pesin, A. Regularities of Asymmetric Deformation and Increasing the Efficiency of the Cold Sheet Rolling Process. Ph.D. Thesis, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, 1989. In Russian)

56. Kasai, D. Strip Warp Behavior and Mechanism in Single Roll Driven Rolling / D. Kasai, A. Komori, A. Ishii, K. Yamada, S. Ogawa // ISIJ Int. – 2016. – 56. – p.1815–1824.

57. Патент СССР №63448. Способ прокатки металлов. Авторы: Разуваев Д.С. // Заявка: 30746, 19.03.1940. Опубликовано: 30.04.1944.

58. Sachs, G. The Flow of Metals through Tools of Circular Contour / G. Sachs, L.J. Klingner. // Appl. Mech. – 1947. – 14. – p. 88-98.

59. Целиков А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, СВ. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 319 с.

60. Целиков А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.

61. Королёв, А.А. О холодной прокатке с рассогласованием скоростей валков / А.А. Королёв // Сталь. – 1973. – № 10. – с. 906-910.
62. Чекмарев, А.П. Прокатка на валках неравного диаметра (непростые случаи прокатки) / А.П. Чекмарев, А.А. Нефедов // Сб. Обработка металлов давлением. – 1956, 4. – с. 2–15.
63. Holbrook, R.L. Effects of Nonsymmetry in Strip Rolling on Single-Roll Drive Mills / R.L. Holbrook, C.F. Zorowski // J. Eng. Ind. – 1966, 88. – p. 401-408.
64. Johnson, W. Further experiments in asymmetrical rolling. / W. Johnson, G. Needham // Int. J. Mech. Sci. – 1966, 8. – p. 443-455.
65. Dewhurst, P. A theoretical and experimental investigation into asymmetrical hot rolling / P. Dewhurst, I.F. Collins, W. Johnson // Int. J. Mech. Sci. – 1974, 16. – p. 389-397.
66. Collins, I.F. A slipline field analysis of asymmetrical hot rolling / I.F. Collins, P. Dewhurst // Int. J. Mech. Sci. – 1975, 17. – p. 643-651.
67. Pan, D. An experimental study of the effect of roll-speed mismatch on the rolling load during the cold rolling of thin strip / D. Pan, D.H. Sansome // J. Mech. Work. Technol. – 1982, 6. – p. 361-377.
68. Dyja, H. Theoretical and experimental analysis of plates asymmetric rolling / H. Dyja, P. Korczak, J.W. Pilarczyk, J. Grzybowski // J. Mater. Process. Technol. – 1994, 45. – p. 167-172.
69. Dyja, H. Asymmetry of the roll gap as a factor improving work of the hydraulic gauge control in the plate rolling mill / H. Dyja, J. Markowski, D. Stoiniski // J. Mater. Process. Technol. – 1996, 60. – p. 73-80.
70. Richelsen, A.B. Elastic-plastic analysis of the stress and strain distributions in asymmetric rolling. // Int. J. Mech. Sci. – 1997, 39. – p. 1199-1211.
71. Выдрин, В.Н. Сдвоенная прокатка-волочение – новый технологический процесс прокатки / В.Н. Выдрин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1974. – № 11. – с. 64-66.

72. Выдрин, В.Н. Поведение концов и геометрия полосы: учеб. пособие по курсу «Теория прокатки». – Челябинск: ЧПИ, 1981. – ч. IV. – 81 с.
73. Выдрин, В.Н. Принципиальные и теоретические основы нового процесса «прокаткаволочение» / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Челябинск, 1971. – Вып. 76. – с. 3-21.
74. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 255 с.
75. Выдрин, В.Н. Исследование непрерывной прокатки в станах с одним приводным валком / В.Н. Выдрин, В.И. Крайнов // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Свердловск, 1967. – Вып. 162. – с. 31-38.
76. Выдрин, В.Н. Точная прокатка сортового металла / В.Н. выдрин, В.Г. Дукмасов // Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1965. - 64 с.
77. Потапкин, В.Ф. Клеть стана холодной прокатки лент / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, И.С. Стеценко // Оборудование для прокатного производства: реф. сб. ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1979. – № 1. – с. 10.
78. Потапкин, В.Ф. Нормальные контактные напряжения при прокатке с волочением и обычной прокатке / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин // Оборудование для прокатного производства: реф. сб. ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1977. – № 10. – с. 19-22.
79. Потапкин, В.Ф. Исследование напряжённо-деформированного состояния металла при прокатке-волочении / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1983. – № 11. – с. 75-80.
80. Потапкин, В.Ф. Особенности деформации металла при асимметричной прокатке тонких полос / В.Ф. Потапкин, А.В. Сатонин, Ю.К. Доброносков // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1987. – № 4. – с. 62-66.
81. Пименов, А.Ф. Асимметричные процессы прокатки – анализ, способы и перспективы применения / А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, А.И. Трайно и др. // Сталь. – 1982. – № 3. – с. 53-56.

82. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 1 / А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – № 9. – с. 64-67.
83. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 2 / А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – № 11. – с. 67-72.
84. Полухин В.П., Скороходов В.Н. Расчёт параметров несимметричного процесса прокатки тонких полос. Сообщение 1 // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1977. – № 1. – с. 169-170.
85. Полухин, В.П. Контактное взаимодействие металла с валками при несимметричной прокатке тонких полос. Сообщение 1 / В.П. Полухин, В.Н. Скороходов // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1976. – № 12. – с. 81-84.
86. Ефремов, Н.И. Разработка технологии асимметричной прокатки на основе результатов исследования особенностей напряжённо-деформированного состояния тонкого листа в очаге деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Ефремов. – М., 1985. – 22 с.
87. Целиков А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
88. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 492 с.
89. Королев А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке. – М.: Машгиз, 1953. – 266 с.
90. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 255 с.
91. Химич Г.Л. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ / Химич Г.Л., Цалюк М.Б. – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.
92. Полухин, В.П. Расчет параметров несимметричного процесса прокатки тонких полос / В.П. Полухин, В.Н. Скороходов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1977. – №2. – с. 126-129.

93. Гришков, А.И. К теории асимметричного процесса продольной прокатки // Известия АН СССР. Металлы. – 1976. – №5. – с. 117-123.
94. Бровман, М.Я. Энергосиловые параметры при прокатке с различными окружными скоростями валков / М.Я. Бровман, В.Н. Выдрин, В.Х. Римен // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – №11. – с.76-80.
95. Сеницын, В.Г. Теоретическое обоснование снижения энергосиловых параметров при несимметричной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. – 1974. – №3. – с. 69-72.
96. Нефедов, А.А. Опережение и угол критического сечения при прокатке в валках разного диаметра // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. №10. – с.75-79.
97. Подольский, В.П. Давление металла в валках, имеющих различные окружные скорости / В.П. Подольский, А.М. Агеев // Теория и технология прокатки. Челябинск. – 1971. – Вып. 76. –с.21-28.
98. Пименов, А.Ф. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки / А.Ф. Пименов, В.Н. Полухин, В.К. Скороходов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – №3. – с.64-68.
99. Выдрин, В.Н. Экспериментальное исследование процесса прокатки с различными окружными скоростями валков/ В.Н. Выдрин, А.М. Агеев, Н.В. Судаков и др. // Обработка металлов давлением. Свердловск. – 1973. – №1. – с.74-77.
100. Сеницын, В.Г. Несимметричная прокатка латуни в промышленных условиях / В.Г. Сеницын, Н.С. Счастливец, С.С. Энштейн и др. // Цветные металлы. – 1972. №6. – с.56-58.
101. Песин, А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки / А.М. Песин // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2002. – № 1. – с. 107-113.

102. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – с. 23-28.

103. Плющение ленты: теория, технология, новые решения / А.М. Песин, В.М. Салганик, К.Ю. Куранов и др. – Магнитогорск, 2002. – 144 с.

104. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. – Магнитогорск, 2013. – 128 с.

105. Салганик, В.М. Новые способы и устройства асимметричной прокатки полос / В.М. Салганик, А.М. Песин, Ю.А. Шабалин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1990. – № 9. – С. 61-63.

106. Песин, И.А. Разработка технологии производства крупногабаритных деталей с криволинейной поверхностью на толстолистовом прокатном стане: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Песин. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2019. – 120 с.

107. Choi, C.-H. The effect of shear texture development on the formability in rolled aluminum alloy sheets / C.-H. Choi, K.-H. Kim, D.N. Lee // Mater. Sci. Forum 1998. – 273–275. – p. 391-396.

108. Cui, Q. Grain refinement of high purity aluminium by asymmetric rolling / Q. Cui, K. Ohori // Mater. Sci. Technol. – 2000. – 16. – p. 1095-1101.

109. Kim, W.J. Effect of the speed ratio on grain refinement and texture development in pure Ti during differential speed rolling / W.J. Kim, S.J. Yoo, H.T. Jeong, D.M. Kim, B.H. Choe, J.B. Lee. // Scr. Mater. – 2011. – 64. – p. 49–52.

110. Loorentz Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling / Loorentz, Y.G. Ko // J. Alloy. Compd. – 2012. – 536. – p. 122-125.

111. Pesin, A. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / A. Pesin, A. Korchunov, D. Pustovoytov, K. Wang, D. Tang, Z. Mi // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014. – №4 (48). – p. 32-40.

112. Песин, А.М. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, С. А. Губанов, А. Э. Новоселов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – Т. 16. – № 4. – с. 175-181.

113. Король, В.К. Основы технологии производства многослойных металлов / В.К. Король, М.С. Гильденгорн. – М.: Металлургия, 1970. – 236 с.

114. Бейгельзимер, Я.Е. Простой сдвиг металлов: что это такое? // Фи-зика и техника высоких давлений. – 2010. – т. 20. № 4. – с. 40-52.

115. Патент РФ № 2542212 МПК В21В 1/28. Способ механического испытания металла. Авторы: Глинер Р.Е., Катюхин Е.Б., Ятунин С.В., Потапов А.Г. // Заявка: 2014112627/28, 01.04.2014. Опубликовано: 20.06.2015. Бюл. №17. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

116. Li, S. Microstructure, texture and mechanical properties of AA1060 aluminum plate processed by snake rolling / Qin N., Liu J. Zhang, X.-M. // Materials & Design. – 2016. – 90. – p. 1010-1017.

117. Bintu, A. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182 / A. Bintu, G. Vincze, R.C. Picu, A.V. Lopes // Mater. Des. – 2016. – 100. –p. 151–156.

118. Патент РФ № 2 622 196 МПК В21В1/28. Способ прокатки металлических листов. Авторы: Песин А.М., Пустовойтов Д.О. // Заявка: 2016100662, 11.01.2016. Опубликовано: 13.06.2017 Бюл. № 17. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

119. Патент РФ № 2542212 МПК В21В 1/28. Способ производства холоднокатаной полосы. Авторы: Песин А.М., Пустовойтов Д.О // Заявка:

2013149661/02, 06.11.2013. Опубликовано: 20.02.2015. Бюл. №5. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

120. Песин, А.М. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 150 с.

121. Kraner, J. Microstructure and Texture Evolution with Relation to Mechanical Properties of Compared Symmetrically and Asymmetrically Cold Rolled Aluminum Alloy /J. Kraner, P. Fajfar, H. Palkowski, G. Kugler, M. Godec, I. Paulin // Metals . – 2020. – 10(2), 156. – p. 1-14.

122. Li, Y.H. Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling / Y.H. Li, Zh. Li, L. Fu, B. Fu, A. Shan // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 558. – p. 309-318.

123. Hallberg, H. Influence of Process Parameters on Grain Refinement in AA1050 Aluminum during Cold Rolling // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – p. 260-272.

124. Zuo, F. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling / F. Zuo, J. Jiang, A. Shan // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008. V. 18. P. 774-777.

125. Песин, А.М. Компьютерное моделирование новых методов интенсивной пластической деформации металлов и сплавов: монография / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин, Т.В. Швеева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – 146 с.

126. Jiang, J. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling / J. Jiang, Y. Ding, F. Zuo, A. Shan // Scr. Mater. – 2009. – 60 – p. 905–908.

127. Xu, G. Achieving high strain rate superplasticity of an Al-Mg-Sc-Zr alloy by a new asymmetrical rolling technology / G. Xu, X. Cao, T. Zhang, Y. Duan, X. Peng, Y. Deng, Z. Yin // *Mater. Sci. Eng. A* – 2016/ – 672 – p. 98–107.
128. Duan, Y. Excellent high strain rate superplasticity of Al-Mg-Sc-Zr alloy sheet produced by an improved asymmetrical rolling process / Y. Duan, G. Xu, L. Tang, Y. Liu, J. Xu, Y. Deng, Z. Yin // *J. Alloy. Compd.* – 2017. – 715. – p. 311–321.
129. Simoes, F.J.P. Mechanical behavior of an asymmetrically rolled and annealed 1050-O sheet / F.J.P. Simoes, R.J.A. Sousa, J.J.A. Gracio, F. Barlat, J.W. Yoon // *Int. J. Mech. Sci.* – 2008. – 50. – p. 1372–1380.
130. Lee, J.-H. Calculation of plastic strain ratio of AA1050 Al alloy sheet processed by heavy asymmetric rolling-annealing followed by light rolling-annealing / J.-H. Lee, G.-H. Kim, S.K. Nam, I. Kim, D.N. Lee // *Comput. Mater. Sci.* – 2015. – 100. – p. 45–51.
131. Kraner, J. Microstructure and Texture Evolution with Relation to Mechanical Properties of Compared Symmetrically and Asymmetrically Cold Rolled Aluminum Alloy / J. Kraner, P. Fajfar, H. Palkowski, G. Kugler, M. Godec, I. Paulin // *Metals* – 2020. – 10. – p. 156.
132. Dutta, S. Effect of asymmetric rolling on formability of pure aluminium / S. Dutta, M.S. Kaiser // *J. Mech. Eng.* – 2015. – 44. – p. 94–99.
133. Tamimi, S. Asymmetric rolling of thin AA-5182 sheets: Modelling and experiments / S. Tamimi, J.P. Correia, A.B. Lopes, S. Ahzi, F. Barlat, J.J. Gracio // *Mater. Sci. Eng. A* – 2014. – 603. – p. 150–159.
134. Ko, Y.G. Microstructure stability and mechanical properties of ultrafine grained 5052 Al alloy fabricated by differential speed rolling / Y.G. Ko, K. Hamad // *Mater. Sci. Eng. A* – 2018. – 733. – p. 24–27.
135. Yang, H.W. Effect of deformation path on texture and tension properties of submicrocrystalline Al-Mg-Si alloy fabricated by differential speed rolling / H.W. Yang, I.P. Widiyantara, Y.G. Ko // *Mater. Lett.* – 2018. – 213. – p. 54–57.

136. Jin, H. Evolution of texture in AA6111 aluminum alloy after asymmetric rolling with various velocity ratios between top and bottom rolls. / H. Jin, D.J. Lloyd // *Mater. Sci. Eng. A* – 2007. – 465. – p. 267–273.

137. Polkowski, W. Differential Speed Rolling: A New Method for a Fabrication of Metallic Sheets with Enhanced Mechanical Properties, *Progress in Metallic Alloys* / W. Polkowski // *Progress in Metallic Alloys* – 2016. – p.111-126.

138. Песин, А.М. Анализ известных публикаций по асимметричной прокатке, опубликованных в ScienceDirect за последние 20 лет / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.Е. Кожемякина, М.Ю. Фомин, Д.М. Потапцев // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции.* – 2020. – с. 175.

139. Pesin, A. Modeling of the roll wear and material damage during high-ratio differential speed rolling of aluminium alloy 7075/ A. Pesin, D. Pustovoytov, N. Lokotunina // *MATEC Web of Conferences.* – 2016. – V. 80. 04006. – p. 1-6.

140. Песин, А.М. Оценка поврежденности металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина // *Качество в обработке материалов.* – 2015. – № 2. – с. 63-67.

141. Pustovoytov, D. Influence of small microscopic grooves of work rolls on strain gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling / D. Pustovoytov, A. Pesin, N. Lokotunina, A. Kozhemiakina // *METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 2019.* – p. 265-270.

142. Pesin, A. Development of theory and technologies for hybrid metal forming of steel complex parts / M. Chukin, P. Tandon, D. Pustovoytov, E. Drigun, I. Pesin, A. Kozhemiakina // *METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 2018.* – p. 261-265.

143. Бирюкова, О.Д. Пустовойтов Д.О. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий

1xxx, 2xxx, 5xxx – 7xxx / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов // Журнал технических исследований. «Научно-издательский центр ИНФРА-М». – 2019. – Т. 5. – № 1. – с. 53-59.

144. Pesin, A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O. FEM Simulation and analysis of temperature rise during asymmetric cryorolling of aluminum alloys with a large strain / A.M. Pesin, O.D. Biryukova, D.O. Pustovoitov // 27th International Conference on Metallurgy and Materials Conference Proceedings Metal. – 2018. – p. 298-304.

145. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки). Учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин – Ульяновск: УлГУ, 2013 – 112 с.

146. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов по специальности «Обработка металлов давлением» / Г. Я. Гун ; Ред. П. И. Полухин . – М. : Metallurgiya, 1983 . – 352 с.

147. Курант Р. Методы математической физики. – М.: Гостехиздат, 1951. – 544 с.

148. Аргрис Д. Современные достижения в методах расчета конструкций с применением матриц. – М.: Стройиздат, 1968. – 241 с.

149. Зенкевич О.К., Ченг Ю.К. Метод конечных элементов в задачах непрерывной механики. – М.: Недра, 1974. – 241 с.

150. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

151. Галлагер Р. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

152. Норри Д. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

153. Kim, K.-H. Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled aluminum sheets / K.-H. Kim, D.N. Lee // Acta mater. – 2001. – 49. – p. 2583–2595.

154. Choi, C.-H. Analysis of deformation texture inhomogeneity and stability condition of shear components in f.c.c. metals / C.-H. Choi, J.-W. Kwon, Ch.-H. Choi, J.-W. Kwon, K. H. Oh, D.N. Lee // Acta mater. – 1997. – Vol. 45, No. 12. – p. 5119—5128

155. Песин, А.М. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса КУКА 160 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, Д.В. Грачев // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2021. – № 1 (16). – с. 9-13.

156. Песин, А.М. Особенности процесса аккумулярующей прокатки многослойных металлических материалов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, К.Г. Пивоварова, П. Тандон, А.Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – № 3 (34). – с. 31-36.

157. Песин, А.М. Исследование возможности получения градиентной структуры металла при асимметричной прокатке алюминия и его сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.Е. Кожемякина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. – 2020. – с. 174.

158. Песин, А.М. Новые технические решения при асимметричной прокатке, созданные на кафедре технологий обработки материалов / Песин, А.М., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е. // Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), 2019. – с. 49-55.

159. Kozhemyakina, A. Development of the asymmetric rolling technology as a severe plastic deformation method for narrow aluminum strips with a gradient structure showing higher strength and ductility / A. Kozhemyakina, A. Pesin, P. Tandon, D. Pustovoytov, O. Biryukova, N. Pina, A.K. Dubey, H.Y. Shahare // Материалы V международной молодежной научно-технической конференции. Под ред. А.Г. Корчунова. Magnitogorsk, 2020. – с. 71-72.

160. Бирюкова, О.Д. Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д.

Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – №2 (37). – с. 38-46.

161. Pesin, A., Pustovoytov D., Biryukova O., Kozhemyakina A., Pivovarova K. Producing brass narrow strips with an ultrafine-grained structure by asymmetric rolling / A. Pesin, D. Pustovoytov, O. Biryukova, A. Kozhemyakina, K. Pivovarova // METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 2021. – p. 306-311.

162. Biryukova, O. A Obtaining laminated aluminum composites with a gradient structure based on asymmetric deformation / O. Biryukova, A. Pesin, D. Pustovoytov, A. Kozhemyakina, L. Nosov // METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 2021. – p. 496-501.

163. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. - М.: Стандартиформ, 2008. – 22 с.

164. ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. - М.: Стандартиформ, 1960. – 39 с.

165. Румянцев М.И. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством: учебное пособие / М.И. Румянцев, Н.А. Ручинская // Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». – 2008. – 210 с.

166. ГОСТ Р 51672-2000 Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия. Основные положения – М.: Стандартиформ, 2001. – 18 с.

167. Песин, А.М. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, И.А. Песин, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, А.И. Сверчков // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 2 (41). – с. 32-42.

168. Kozhemyakina, A. Developing asymmetric rolling process procedures for aluminum narrow strips, showing higher strength and ductility/ A. Kozhemyakina, A.

Pesin, D. Pustovoytov, I. Pesin, L. Nosov// Материалы VI международной молодежной научно-технической конференции. Под ред. А.Г. Корчунова. Magnitogorsk, 2022. – p. 93-94.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Заключение

по результатам экспериментальных исследований получения алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М.В. Чукин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам экспериментальных исследований прокатки алюминиевых лент на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

На стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» проводили экспериментальное исследование получения алюминиевых лент из сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке.

Листовые заготовки имели размеры:

- сплав Д16 – толщина 6,0 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм;
- сплав АМг6 – толщина 1,9 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм;
- сплав АД33 – толщина 2,0 мм; ширина 25,0 мм; длина 100,0 мм.

В ходе экспериментов прокатку образцов алюминиевых сплавов осуществляли за один проход в симметричном и асимметричном режимах. Для обеспечения достоверности полученных результатов десять образцов прокатывали в каждом выбранном режиме. При этом варьировали следующие параметры:

- обжатие от 5 до 89 %;
- отношение скоростей рабочих валков от 1 до 7.

В экспериментах измеряли:

- усилие прокатки, кН;
- конечную толщину образца, мм;
- механические свойства в соответствии с ГОСТ 1497-84 (σ_B , Н/мм²; $\sigma_{0.2}$, Н/мм²; δ , %);
- твердость по Бринеллю не менее, чем в трех точках с каждой поверхности, НВ.

Листовые заготовки алюминиевых сплавов подвергались прокатке при комнатной температуре. Прокатку вели без смазки, на сухих валках во всех случаях.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из Д16 с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава Д16

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
23.09.2021–9	6,00	3,10	48	463,80	5,0/5,0	104	Образец разрушился
23.09.2021–19 (3)	6,00	2,60	58	181,40	8,0/4,0	118	Образец разрушился
23.09.2021–41	6,00	2,00	67	215,10	9,0/3,0	86	Образец разрушился

Продолжение таблицы 1.1

23.09.2021–61	6,00	1,90	68	188,60	8,0/2,0	88	Образец разрушился
23.09.2021–92	6,00	0,90	85	243,00	10,0/2,0	73	Образец сохранил целостность
23.09.2021–94	6,00	0,65	89	230,00	10,0/1,5	68	Образец сохранил целостность
23.09.2021–95	6,00	-	-	-	10,0/1,3	-	Образец расплавился

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из АМгб с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АМгб

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
24.03.2021–6	1,90	0,95	50	290,00	5,0/5,0	12	Образец разрушился
24.03.2021–13	1,90	0,73	62	268,10	8,0/4,0	132	Образец разрушился
24.03.2021–19	1,90	0,90	53	167,70	9,0/3,0	129	Образец разрушился
24.03.2021–25	1,90	0,80	58	211,30	8,0/2,0	121	Образец разрушился
24.03.2021–32	1,90	0,78	59	130,90	10,0/2,0	113	Образец сохранил целостность

Результаты проведенных экспериментов прокатки лент из сплава АД33 с различным отношением скоростей рабочих валков представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Параметры прокатки лент из алюминиевого сплава АД 33

Номер образца	Толщина, мм		Относительное обжатие, %	Усилие, кН	Отношение скоростей валков	Твердость, НВ 5/125	Примечание
	начальная	после прокатки					
25.09.2021–5	2,00	1,20	40	35,39	5,0/5,0	116	Образец разрушился
25.09.2021–12	2,00	0,75	63	320,90	8,0/4,0	118	Образец сохранил целостность
25.09.2021–19	2,00	0,60	70	227,90	9,0/3,0	121	Образец сохранил целостность
25.09.2021–26	2,00	0,50	75	166,30	8,0/2,0	100	Образец сохранил целостность

Продолжение таблицы 1.3

25.09.2021–33	2,00	0,50	75	173,90	10,0/2,0	105	Образец сохранил целостность
---------------	------	------	----	--------	----------	-----	------------------------------

Зависимости твердости алюминиевых лент Д16, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлена на рисунке 1.1.

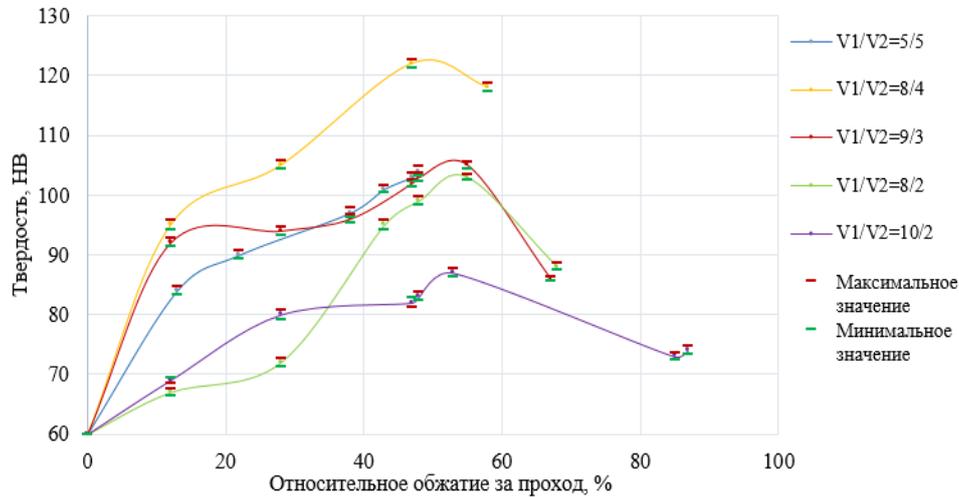


Рисунок 1.1 – Зависимости твердости алюминиевых лент из сплава Д16 от относительного обжатия

Зависимости твердости алюминиевых лент АМг6, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлена на рисунке 1.2

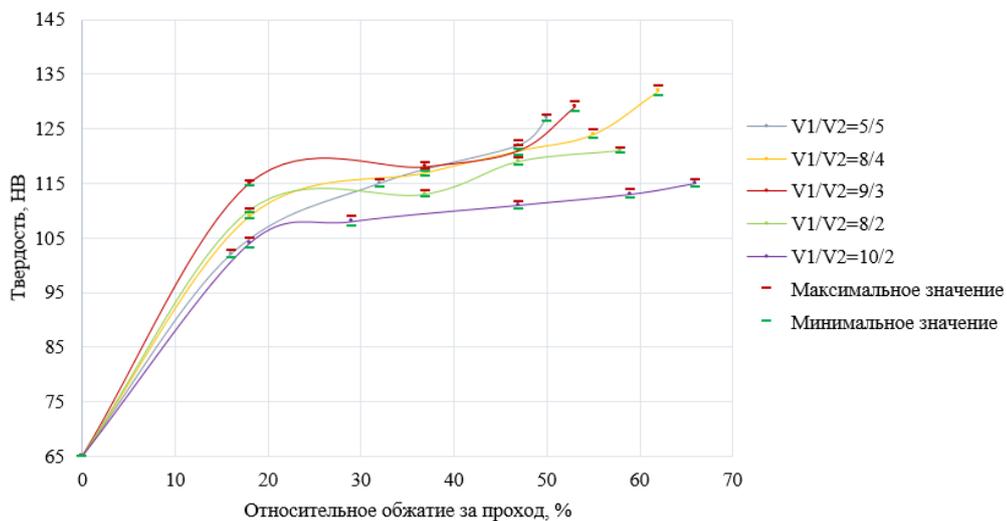


Рисунок 1.2 – Зависимости твердости алюминиевых лент из сплава АМг6 от относительного обжатия

Зависимости твердости алюминиевых лент АД33, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных отношений скоростей валков представлены на рисунке 1.3

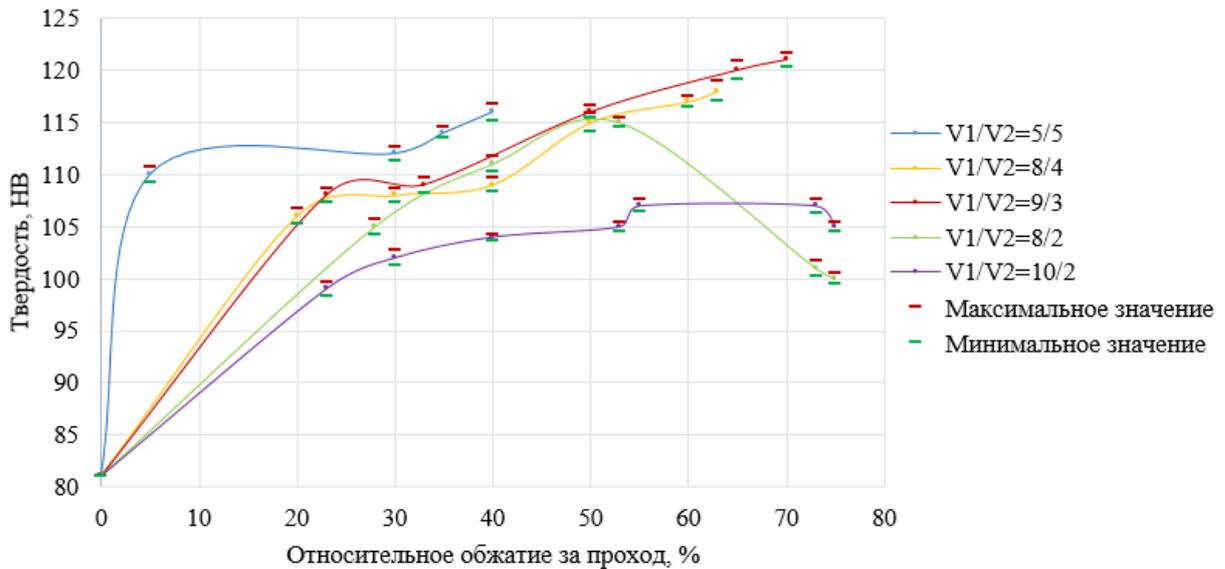


Рисунок 1.3 – Зависимость твердости алюминиевых лент из сплава АД33 от относительного обжатия

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждено значительное снижение усилия деформирования при увеличении отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2=10/2$ в сравнении с обычной прокаткой при степени обжатия соответствующей степени обжатия в симметричном режиме в 3,2 раза (до 144,7 кН) для сплава Д16 при 48 % обжатия, более чем в 2,3 раза для сплава АМг6 при 50 % обжатия, в 1,9 раза для сплава АД33 (до 184,8 кН) при обжатии 40 %.

Показано, что при асимметричной прокатки алюминиевых полос с увеличением отношения скоростей рабочих валков с 1 до 5 существенно увеличивается технологическая пластичность, обеспечивающая сохранение целостности образца Д16 при 89 % обжатия, в то время как при симметричной прокатки образец разрушился при 48 % обжатия; образца АМг6 при 59 % обжатия, в то время как при симметричной прокатки образец разрушился при 50 % обжатия; образца АД33 при 75 % обжатия, в то время как при симметричной прокатки образец разрушился при 40 % обжатия.

Разработан способ регулирования твердости и технологической пластичности алюминиевых лент из сплавов Д16, АМг6 и АД33 в зависимости от отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия за проход.

Научные сотрудники лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»:

Заместитель заведующего лабораторией, д.т.н.
Начальник отдела научно-исследовательской
лаборатории, к.т.н.
Инженер
Инженер, к.т.н.
Инженер

А.М. Песин

Д.О. Пустовойтов

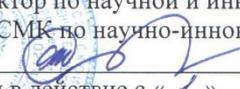
А.Е. Кожемякина

И.А. Песин

Л.В. Носов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Технологический регламент
асимметричной прокатки алюминиевых лент из сплава Д16, АМг6 и АД33
на уникальной научной установке стане дуо 400

	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»			
	Лаборатория МГНМ им. А.П. Жилиева	Версия 1	СМК-РЕ-ЛМГНМ-02-22	Лист 1 Всего листов 7

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и инновационной работе,
Ведущий СМК по научно-инновационной деятельности
 О.Н. Тулупов
Ввести в действие с « 1 » мая 2022 г.

Технологический регламент
асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33
на уникальной научной установке стане дуо 400

Настоящий технологический регламент (далее – ТР) разработан на проведение асимметричной прокатки лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400 – экспериментальном реверсивном стане дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков.

Технологический регламент может применяться в качестве руководства для технологически правильного выполнения работ при прокатке металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 различных назначений.

1 Термины и определения

В настоящем технологическом регламенте применены следующие термины с соответствующими определениями:

коэффициент асимметрии – отношение скорости одного рабочего валка (быстрый) к скорости другого рабочего валка (медленный);

относительное обжатие – отношение абсолютного обжатия (уменьшение толщины заготовки) к начальной толщине, выраженное в процентах;

уникальная научная установка – комплекс научного оборудования, не имеющий аналогов в Российской Федерации, функционирующий как единое целое и созданный научной организацией и (или) образовательной организацией в целях получения научных результатов, достижение которых невозможно при использовании другого оборудования;

уникальная научная установка стан дуо 400 – экспериментальный реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков.

В настоящем Регламенте применены следующие сокращения:

МГНМ – механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева;

МГТУ им. Г.И. Носова – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»;

НИС – научно-инновационный сектор;

ОТ – охрана труда;

ПБ – промышленная безопасность;

ТОМ – технология обработки материалов.

	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»			
	Лаборатория МГНМ им. А.П. Жилева	Версия 1	СМК-РЕ-ЛМГНМ-02-22	Лист 6 Всего листов 7

4.16 Учет результатов прокатки производится исполнителем работ в журнале «Прокатка образцов». По результатам прокатки в выбранных режимах составляется протокол испытаний, по форме (Приложение А).

5 Отделка и контроль качества

5.1 При прокатке лент на стане контролируется:

- состояние поверхности рабочих валков;
- чистота стана (отсутствие металлических частиц, грязи и других посторонних предметов).

5.2 После прокатки производится визуальный осмотр качества поверхности полученных лент, осуществляется контроль толщины ленты цифровым микрометром.

5.3 Если обнаружены дефекты поверхности (гармошка, раскатанное загрязнение, волосовина, рванина на кромках, отпечатки и т.д.) производят повторную прокатку ленты с теми же технологическими параметрами. В этом случае образцу присваивается тот номер со скобкой, в скобке указывается номер прохода.

5.4 Если визуальный осмотр не выявил дефектов, лентурезают на листы размеров, заданных заказчиком.

5.5 Контроль качества готовых лент предполагает:

- определение соответствия размеров лент требуемым размерам;
- измерение механических свойств (твердость, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение);
- анализ структуры.

6 Ответственность

6.1 *Проректор по научной и инновационной работе*, Ведущий СМК по научно-инновационной деятельности несет ответственность за недопущение превышения полномочий вовлеченного персонала при работе на уникальной научной установке, а также за координацию всех работ по ликвидации и исправлению несоответствий, связанных с исполнителями данной деятельности, и принятия решения о дальнейшем использовании данного технологического регламента.

6.2 *Заведующий лабораторией «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева»* несет ответственность за исполнение требований настоящего технологического регламента, координацию всех работ по асимметричной прокатке образцов алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400 асимметричной прокатки, за соблюдение инструкций по ОТ при выполнении работ на уникальной научной установке.

6.3 *Исполнители работ* несут ответственность за выполнение всех операций в точном соответствии технологического регламента.

СМК-ТР-02-22 Система менеджмента качества. Технологический регламент асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400 разработал

Инженер НИС,
аспирант кафедры ТОМ

Согласовано:

Начальник отдела менеджмента качества
Заместитель заведующего лабораторией
«МГНМ им. А.П. Жилева», д.т.н., проф.
Начальник отдела лаборатории, старший научный
сотрудник, к.т.н.



А.Е. Кожемякина



А.Ю. Глухова



А.М. Песин



Д.О. Пустовойтов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Уведомление о приеме и регистрации заявки на изобретение

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

25.07.2022	043175	2022120537
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) оригинала документа заявки	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
25 ИЮЛ 2022	(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу	
<input type="checkbox"/> (86) (номер и дата международной заявки и дата международной подачи, установившие приоритет изобретения)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (почтовый адрес, фамилия и имя/имья или наименование адреса) 455000, г. Магнитогорск, пр.Ленина, д.38, ФГБОУ ВО «МГТУ им.Г.И.Носова», Коротковой Ю.В.	
<input type="checkbox"/> (87) (номер и дата международной публикации международной заявки)	Телефон: (3519) 29-84-63 Факс: Адрес электронной почты: RIO_228@mail.ru	
<input type="checkbox"/> (96) (номер европейской заявки и дата ее подачи)	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ (используется при подаче заявки на секретное изобретение)	
<input type="checkbox"/> (97) (номер и дата публикации европейской заявки)		
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на изобретение		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация
(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Способ асимметричной прокатки полосы из алюминиевого сплава Д16		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее - при наличии) полностью или наименование юридического лица (полное по юридическому документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ	
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») пр. Ленина, д. 38, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000, Россия	ОГРН 1027402065437 КПП 745601001 ИНН 7414002238	
<input checked="" type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование)	СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер)	
<input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input checked="" type="checkbox"/> государственному контракту муниципальному контракту заказчик работ Минобрнауки РФ контракт от 08.06.2021 г. № 075-15-2021-627 Мегагрант по Постановлению Правительства РФ №220 от 09.04.2010г.	КОД СТРАНЫ (если не установлен) RU	
<input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту муниципальному контракту Заказчик работ РФФИ контракт от 03.09.2020 № 20-38-90097/20 Заказчик работ РНФ Контракт от 20.05.2020 № 20-69-46042		
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ (указать полностью фамилию, имя, отчество (последнее - при наличии) лица, лично или через представителя для ведения дел по патентному материалу от его имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или ином органе власти в силу закона)	<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input checked="" type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону	

ОТД 117
28 ИЮЛ 2022
240-60-15

Общее количество документов в листах	27	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	Атаказова И.М.
Количество платежных документов	2	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/register-web		

Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) Короткова Юлия Васильевна Адрес: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38 Срок представительства (если к заявлению приложена доверенность представителя заявителя, срок может не указываться)		Телефон: (3519) 29-84-63 Факс: Адрес электронной почты: rio_228@mail.ru Регистрационный номер патентного поверенного	
(72) АВТОР Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии)		Адрес места жительства, включающий официальное наименование страны и ее код	
Песин Александр Моисеевич Пустовойтов Денис Олегович Кожемякина Анна Евгеньевна Песин Илья Александрович Носов Леонид Васильевич Локотунина Наталья Михайловна		пр. Metallургов, 11, кв.54, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455000, Россия, RU пр. К. Маркса, 226, кв. 39, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455045, Россия, RU пр. К.Маркса, 136/2, кв. 16, г. Магнитогорск, Челябинская обл. 455037, Россия, RU пр. Metallургов, 11, кв.31, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455000, Россия, RU ул. Полярная, 40, г. Магнитогорск, Челябинская обл. Россия, RU, 455021 ул. Оренбургская, 110, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455025, Россия, RU	
<input type="checkbox"/> Я (мы) _____ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии)) Прошу (просим) не упоминать меня (нас) как автора(ов) при публикации сведений <input type="checkbox"/> о заявке <input type="checkbox"/> о выдаче патента Подпись(и) автора(ов) <input type="checkbox"/> Просьба автора(ов) не упоминать его (их) при публикации прилагается (отмечается при подаче заявки в электронном виде)			
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИЛАГАЕМЫХ ДОКУМЕНТОВ		Количество листов в 1 экз.	Количество экземпляров
<input checked="" type="checkbox"/> описание изобретения		6	2
<input type="checkbox"/> перечень последовательностей			
<input checked="" type="checkbox"/> формула изобретения (количество пунктов формулы <u>2</u>) (указать)		1	2
<input checked="" type="checkbox"/> чертеж(и) и иные материалы фигуры чертежей, предлагаемые для публикации с рефератом <u>1</u> (указать)			
<input checked="" type="checkbox"/> реферат		1	2
<input checked="" type="checkbox"/> копия документа, подтверждающего уплату патентной пошлины (пошлин), (представляется по собственной инициативе заявителя)		1	1
<input type="checkbox"/> ходатайство о предоставлении права на освобождение от уплаты патентной пошлины или на уплату этой пошлины в уменьшенном размере			
<input type="checkbox"/> копия первой заявки (при испрашивании конвенционного приоритета)			
<input type="checkbox"/> перевод заявки на русский язык			
<input checked="" type="checkbox"/> доверенность		1	1
<input type="checkbox"/> согласие представителя заявителя на обработку его персональных данных			
<input type="checkbox"/> другой документ _____ (указать наименование документа)			
<input type="checkbox"/> дополнительные листы к настоящему заявлению			
<input type="checkbox"/> копия документов заявки (описание, формула изобретения, чертежи (если имеются) и реферат) на машиночитаемом носителе Подтверждаю, что копия документов заявки на машиночитаемом носителе является точной копией документов, представленных на бумажном носителе.			
<input type="checkbox"/> копия перечня последовательностей на машиночитаемом носителе			

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

ООО «ЧерметИнформСистемы»

Е.В. Феоктистова



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования

г. Магнитогорск

«16» *июля* 2022 г.

Настоящим актом подтверждается, что в ООО «ЧерметИнформСистемы» приняты к использованию результаты диссертационной работы Кожемякиной Анны Евгеньевны на соискание ученой степени кандидата технических наук, связанные с повышением технологической пластичности алюминиевых лент из сплавов Д16, АМг6, АД33 при асимметричной прокатке:

- численное исследование параметров асимметричной прокатки с помощью программного комплекса «Deform 2/3D»;
- технологические схемы производства лент из алюминиевых сплавов Д6, АМг6 и АД33 с повышенной технологической пластичностью;
- технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при асимметричной прокатке с возрастающей пластичностью;
- технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки;
- технологические способы регулирования твердости металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке;
- результаты экспериментов, выполненные на лабораторно-промышленном стане 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Ведущий специалист
ООО «ЧерметИнформСистемы»

Н.Н. Сновалкина

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.



पंडित द्वारका प्रसाद मिश्र
भारतीय सूचना प्रौद्योगिकी,
अभिकल्पन एवं विनिर्माण संस्थान जबलपुर
(संसदीय अधिनियम द्वारा स्थापित राष्ट्रीय महत्व का संस्थान)

Pandit Dwarka Prasad Mishra
Indian Institute of Information Technology,
Design & Manufacturing Jabalpur
(An Institute of National Importance established by an Act of Parliament)

.Act of implementation of the projects results

This act confirms that the results of the Indo-Russian projects “Numerical modeling and development of new methods for hybrid metal forming of complex parts of ultra-high strength (UHS) materials” (DST, India and RFBR, Russia) and “Development of low weight nanostructured functionally graded materials for high strength applications by hybrid asymmetric rolling and incremental forming methods” (DST, India and RSF, Russia) conducted by Pesin Alexander, Denis Pustovoytov, Pesin Ilya, Biryukova Olesya, Kozhemiakina Anna, Nosov Leonid, Grachev Dmitry are used in the process of teaching of graduate and doctoral students at PDPM Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India.

In the process of education, the following aspects are taken into account:

(i) new efficient technological schemes of asymmetric rolling, asymmetric accumulative roll bonding, allowing to obtain strips from steel, aluminum, titanium and copper alloys.

(ii) new efficient technological schemes of hybrid processes of asymmetric rolling and incremental forming, allowing to obtain products of complex shape from steel, aluminum, titanium and copper sheets with a gradient structure.

(iii) new dependences of the influence of the parameters of the asymmetric rolling process (thickness of the strip, relative reduction, ratio of the speeds of the work rolls, diameter of the work rolls, coefficient of friction, tension) on the heating of the metal in the rolls and the degree of gradient of its structure along the thickness of the strip in the range of the ratio of the speeds of the work roll from 1 to 10.

(iv) new dependences of the influence of the parameters of the accumulative roll bonding processes (thickness of each layer of the strip, relative reduction, ratio of work roll speeds, work roll diameter, coefficient of friction, tension) on the structure and mechanical properties of the layered composite.

Asymmetric rolling makes it possible to significantly (up to 6 times) reduce the rolling force, as well as increase technological plasticity (the possibility of deformation without defects increases from 40...50% to 80...90%).

The developed technological regimes make it possible to change (increase or decrease) the hardness of the metal within a wide range.

Besides teaching, we have also employed the research outcomes of Nosov Magnitogorsk State Technical University in our group's research work; and this has not only enhanced our research capabilities but has also led to interesting solutions for the Indian industry.


08-04-2022

Puneet Tandon

Indian PI

DST-RFBR and DST-RST Projects

Puneet Tandon

Professor

PDPM-IIT DM

Jabalpur (Duma) Airport Road,
Jabalpur - 482005, M.P. India

Phone : +91+761-2794065, Fax : +91-761-2794094

Website : www.iitdmj.ac.in

डुमना विमानतल मार्ग,
जबलपुर - 482005, म.प्र. भारत
दूरभाष : +91-761-2794065, फ़ैक्स : +91-761-2794094
वेबसाईट : www.iitdmj.ac.in



एक कदम स्वच्छता की ओर

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт внедрения результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий научно-исследовательской
лабораторией «Механика градиентных
наноматериалов им. А.П. Жилиева»
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,

д.т.н., профессор

 Г.И. Рааб

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается, что в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» приняты к использованию результаты диссертационной работы Кожемякиной Анны Евгеньевны на соискание ученой степени кандидата технических наук:

- технологические схемы производства алюминиевых лент из сплавов Д16, АМг6 и АД33 с повышенной технологической пластичностью;
- технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при асимметричной прокатке с возрастающей пластичностью;
- технологическая схема производства алюминиевых лент из сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки;
- технологические способы регулирования твердости лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 при асимметричной прокатке;
- технологический регламент асимметричной прокатки металлических лент из алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АД33 на уникальной научной установке стане дуо 400;
- результаты экспериментов, выполненные на лабораторно-промышленном стане 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Разработанные технологические схемы и способы, результаты экспериментов по прокатке алюминиевых лент использованы при выполнении работ по проектам «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений», «Разработка технологии асимметричной прокатки как метода интенсивной пластической деформации алюминиевых лент с градиентной структурой, обладающих повышенной прочностью и пластичностью».

Начальник отдела научно-исследовательской
лаборатории, к.т.н.



 Д.О. Пустовойтов



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт использования результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности

Д.В. Терентьев

АКТ

об использовании в учебном процессе

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы Кожемякиной А.Е.

Результаты диссертационной работы Кожемякиной А.Е., связанной с повышением технологической пластичности алюминиевых лент за счет рассогласования скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке, на основе моделирования процессов асимметричной прокатки в программном комплексе DEFORM 2D/3D, выполненной на кафедре технологий обработки материалов, внедрены в учебный процесс на основании рекомендаций методической комиссии Института металлургии, машиностроения и материалообработки.

В работе развивается подход, разработанный на кафедре технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», по использованию асимметричной прокатки металлических лент, в частности, дополнительно к полученным ранее результатам показано, что увеличение отношения скоростей рабочих валков с 1,0 до 6,7 раз приводит к снижению усилия прокатки по сравнению с симметричным случаем в 1,9-3,2 раза, увеличению технологической пластичности для разных алюминиевых сплавов (для Д16 с 48 до 89 %, для АМгб с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %).

В образовательной деятельности используются результаты диссертационного исследования:

– постановка задачи компьютерного описания процесса асимметричного деформирования, отличающаяся формулированием граничных и начальных условий, а также принятием допущений процесса, по результатам которого выявлено влияние основных параметров технологических процессов (обжатия, коэффициенты трения, отношения скоростей валков) асимметричной прокатки алюминиевых лент при отношении скоростей рабочих валков от 1 до 5 на напряженно-деформированное состояние алюминиевых сплавов;

- новые технологические схемы производства алюминиевых лент с повышенной технологической пластичностью, позволяющие исключить от одной до трех прокаток и от одного до четырех отжигов;
- способ производства алюминиевых лент с возрастающей пластичностью;
- способ производства лент из алюминиевого сплава Д16 при комбинировании асимметричной и симметричной прокатки.

Результаты диссертационного исследования используются при проведении лекционных и практических занятий по направлениям 22.03.02 Metallurgy, профиль Обработка металлов давлением (дисциплины «Моделирование процессов и объектов в металлургии», «Новые технологические решения в процессах обработки металлов давлением», «Введение в направление»), 22.04.02 Metallurgy, направленность (профиль/специализация) программы Инжиниринг инновационных технологий в обработке металлов давлением (дисциплины «Перспективы технологического развития в обработке материалов давлением на примере лучших изобретений», «Проектирование и технологическая поддержка инновационной деятельности наукоёмких производств», «Дизайн инновационных технологий в обработке материалов давлением»).

Председатель методической
комиссии Института металлургии,
машиностроения и материалобработки


А.С. Савинов

Заведующий кафедрой
технологий обработки материалов


А.Б. Моллер