

На правах рукописи



Кожемякина Анна Евгеньевна

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

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель –	Песин Александр Моисеевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Галкин Сергей Павлович доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО НИТУ «Московский институт стали и сплавов», профессор кафедры Обработка металлов давлением Бельский Сергей Михайлович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», профессор кафедры Обработка металлов давлением
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 20 декабря 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www/magtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы. 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.

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.

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.

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 %.

Одним из важных требований к листовым алюминиевым сплавам является технологическая пластичность или способность обрабатываться. Традиционно при прокатке металлов и сплавов происходит их упрочнение и соответственно снижение технологической пластичности. 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 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.

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

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 заключается в следующем:

1. На основе компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 2D/3D 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. 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 работы:

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 АМг6 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, АМг6, АД33 на стане дуо 400 внедрены в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева». 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. Жилиева» 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости истинной деформации ϵ от отношения скоростей рабочих валков и относительного обжатия алюминиевых лент, отличающиеся достижением экстремального значения истинной деформации 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. 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 отожженном 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 результатов. 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 конструктивных 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.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 168 наименований, 7 приложений. Текст диссертации изложен на 136 страницах машинописного текста, содержащих 54 рисунка, 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены цель и задачи исследования, определены его актуальность и научная новизна, показаны теоретическая и практическая значимости работы.

В первой главе показана перспективность применения алюминиевого проката в различных отраслях промышленности, приведено обоснование использования в исследовании алюминиевых сплавов Д16 (2xxx серия), АМг6 (5xxx серия) и АД33 (6xxx серия). Отмечено, что при традиционной симметричной прокатке алюминиевых сплавов происходит их упрочнение и соответственно снижение технологической пластичности. 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 тех-

нологического процесса и снижению производительности, а также введению дополнительных ограничений технологического процесса. В работах отечественных и зарубежных ученых показано, что одним из перспективных способов получения требуемых свойств проката, является процесс асимметричной прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет различия окружных скоростей рабочих валков. Выявлено, что вопросы повышения технологической пластичности изучены недостаточно. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов и проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния алюминиевых листов при симметричной и асимметричной прокатке.

Целью компьютерного исследования было нахождение таких значений технологических параметров, как отношение скоростей рабочих валков, коэффициент контактного трения, обжатие, диаметры рабочих валков, при которых истинная деформация принимает максимальное значение.

Для решения задач диссертационного исследования был выбран программный продукт DEFORM 2D/3D. Исходные данные для моделирования процесса: начальная толщина полосы $h_0 = 1,0-8,0$ мм; исходная температура заготовки: 20 °С; диаметр рабочих валков $R = 100-500$ мм; трение согласно закону Кулона; коэффициент трения $\mu = 0,05-0,4$; степень деформации (обжатие) $\varepsilon = 10-90$ %; окружная скорость нижнего валка $V_1 = 100$ мм/сек; отношение скоростей валков от 1 до 5.

Показано, что истинная деформация e возрастает с возрастанием отношения скоростей рабочих валков и при отношении скоростей рабочих валков на 4-24 % меньше отношения входной и выходной толщин листа достигает максимальных значений (рисунок 1). Чем меньше коэффициент трения, тем отношение скоростей рабочих валков должно быть меньше.

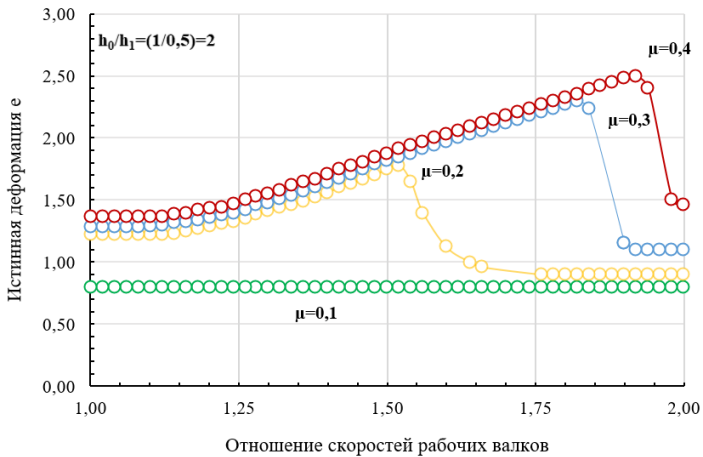


Рисунок 1 – Влияние коэффициента трения и отношения скоростей валков на величину истинной деформации материала при асимметричной тонколистовой прокатке ($h_0 = 1$ мм, $\varepsilon = 50$ %)

Истинная деформация возрастает также при уменьшении начальной толщины заготовки и при увеличении диаметров рабочих валков (рисунок 2).

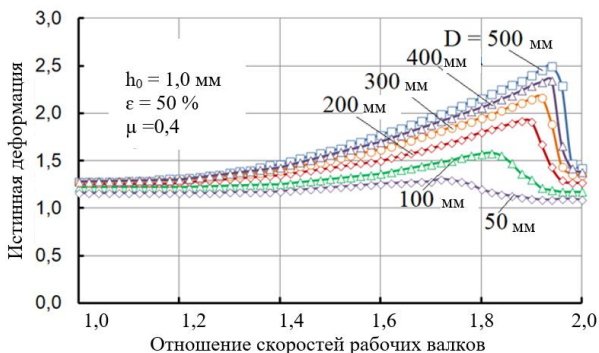


Рисунок 2 – Влияние отношения скоростей и диаметра валков на величину истинной деформации

Установлено, что при асимметричной прокатке ($V_1/V_2=5$) образцов алюминиевого сплава АМг6 с обжатием $\varepsilon = 66 \%$ усилие прокатки снижается с 610,0 до 192,2 кН в сравнении с симметричным случаем, при этом момент на нижнем валке увеличивается в 1,4 раза с 3,8 до 5,6 кН·м, а на верхнем убывает в 1,3 раза до 2,9 кН·м. Аналогично усилие прокатки при асимметричной прокатке снижается в 2,9 (обжатие 64 %, $V_1/V_2=5$) и 3,5 раз (обжатие 87 %, $V_1/V_2=5$) для соответственно сплавов АД33 и Д16.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований на лабораторно-промышленном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», признанном уникальной научной установкой в 2022 году.

Целями экспериментальных исследований являлись: проверка адекватности компьютерного моделирования по усилиям и моментам прокатки, а также определение комплекса технологических параметров асимметричной прокатки, позволяющих повысить технологическую пластичность алюминиевых лент, регулировать в широком диапазоне твердость по Бринеллю, увеличить значение относительного удлинения после разрыва при деформации 70-87 %, снизить значение отношения предела текучести к временному сопротивлению.

Основные характеристики лабораторно-промышленного стана 400: индивидуальный привод рабочих валков диаметром 340 мм; максимально допустимое усилие прокатки – 2500 кН; крутящие моменты – 2·65 кН·м; мощность главного привода – 2·75 кВт.

Экспериментальные исследования на стане 400 подтвердили адекватность полученных во второй главе компьютерных моделей по усилиям (таблица 1). Отклонение рассчитанных значений моментов прокатки на каждом из рабочих валков от измеренных не превышало 15 %.

Таблица 1 – Усилия прокатки, полученные при моделировании процесса и экспериментальным путем

Алюминиевый сплав	Отношение скоростей валков	Относительное обжатие, %	Максимальное усилие, кН, при моделировании процесса	Максимальное 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

Для экспериментального исследования были выбраны наиболее распространенные алюминиевые сплавы Д16, АМг6 и АД 33, широко применяемые в различных отраслях промышленности, описание которых приведено в первой главе.

Прокатку образцов алюминиевых сплавов шириной 25,0 мм; длиной 100,0 мм; толщиной 6,0 мм (образцы Д16); 2,0 мм (образцы АД33); 1,9 мм (образцы АМг6) осуществляли за один проход в симметричном и асимметричном режимах при комнатной температуре, без смазки, на сухих валках. Для обеспечения достоверности полученных результатов десять образцов прокатывали в каждом выбранном режиме. Высокое значение коэффициента трения достигалось предварительной прокаткой (не менее 5 мин.) заготовок из сплавов алюминия.

При прокатке варьировали следующие параметры: относительное обжатие за проход от 5 до 89 %; отношение скоростей рабочих валков от 1,0 до $\approx 7,7$. 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 , %); твердость по Бринеллю не менее, чем в трех точках с каждой поверхности, НВ.

В результате проведенных экспериментов выявлено повышение технологической пластичности алюминиевых лент при асимметричной прокатке. Так при обычной симметричной прокатке ($V_1/V_2 = 5,0/5,0$) алюминиевого сплава Д16 за один проход образец разрушался при попытке деформировать его до толщины 3,1 мм (обжатие 48 %). Увеличение отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ позволило получить алюминиевую ленту конечной толщиной 0,8 мм, относительное обжатие за проход – 87 %. Дальнейшее увеличение отношения скоростей рабочих валков до $V_1/V_2 = 10,0/1,5$ позволило получить алюминиевую ленту конечной толщиной 0,65 мм (обжатие 89 %). При отношении скоростей валков $\approx 7,7$ ($V_1/V_2=10,0/1,3$) происходило расплавление образца.

Увеличение технологической пластичности при введении асимметрии было экспериментально подтверждено и для образцов алюминиевых сплавов АМг6 с 50 до 59 %, для АД33 с 40 до 75 %.

В результате проведенных исследований было выявлено снижение усилия прокатки при увеличении отношения скоростей рабочих валков. Так при прокатке образцов алюминиевого сплава Д16 при отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2=10,0/2,0$ усилие снижалось более чем в 3,2 раз (с 463,8 кН до 144,7 кН) при степени обжатия, соответствующей степени обжатия в симметричном режиме.

Аналогичный характер снижения усилия при асимметричной прокатке выявлен для образцов алюминиевых сплавов АМг6 и АД33. Так снижение усилия при прокатке образцов алюминиевого сплава АД33 составило 1,9 раз (с 353,9 кН до 184,8 кН) при степени обжатия равной 40 %, снижение усилия при прокатке образцов алюминиевого сплава АМг6 составило 2,3 раза (с 290,0 кН до 125,5 кН) при степени обжатия равной 50 %.

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) (рисунок 3).

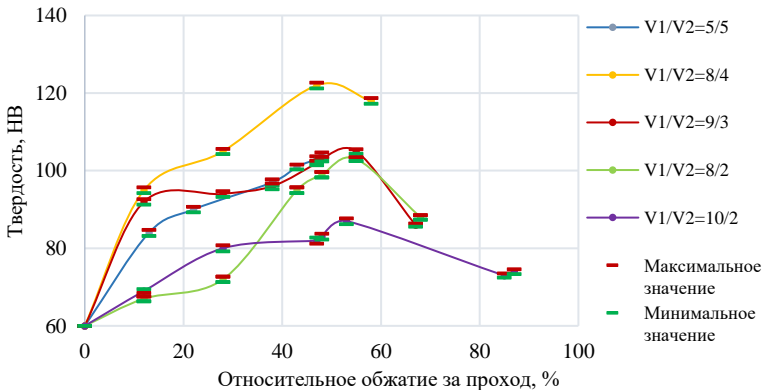


Рисунок 3 – Зависимости твердости лент из алюминиевого сплава Д16 от относительного обжатия

Из рисунка 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 – 67 НВ – при отношении скоростей $V_1/V_2=8,0/2,0$ и обжатии 12 %.

Аналогичные зависимости твердости алюминиевых лент, полученных после прокатки, от относительного обжатия для различных соотношений скоростей валков получены для образцов алюминиевых сплавов АМг6 и АД33. Так, наибольшее значение твердости 132 НВ было достигнуто в АМг6 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 %. В сплаве АД33 наибольшее значение твердости 121 НВ было достигнуто 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 %.

Впервые 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, после асимметричной прокатки относительное

удлинение после разрыва увеличивалось с 6,2 до 12,3 % (таблица 2), в то время как, в симметричном случае оно снижалось с 6,2 до 0,3.

Таблица 2 – Механические свойства лент из сплава Д16, полученных после прокатки

Образец	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2} / \sigma_{\text{в}}$	Относительное удлинение, δ , %
Образец после асимметричной прокатки без смазки ($V_1/V_2 = 10/2$, относительное обжатие за проход 87 %)	283,6±1,3	234,4±1,1	0,83	12,3±0,13
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

Следует отметить, что при асимметричной прокатке на 13 % (с 0,95 до 0,83) уменьшается значение отношения $\sigma_{0,2} / \sigma_{\text{в}}$, по сравнению с симметричным случаем.

В четвертой главе описаны разработанные технологические схемы повышения технологической пластичности при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов Д16, АМг6 и АД33 на лабораторно-промышленном стане дуо 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жиляева». 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 (заявка на изобретение «Способ асимметричной прокатки полосы из алюминиевого сплава Д16» № 2022120537 от 25.07.2022 года).

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).

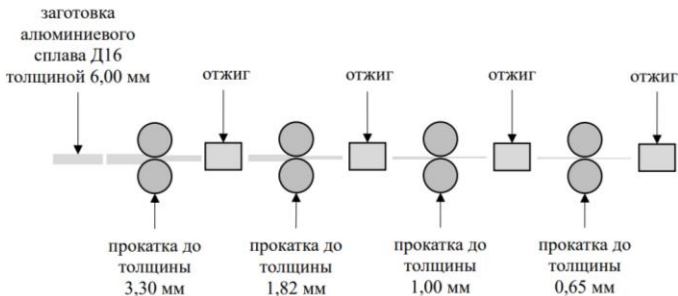


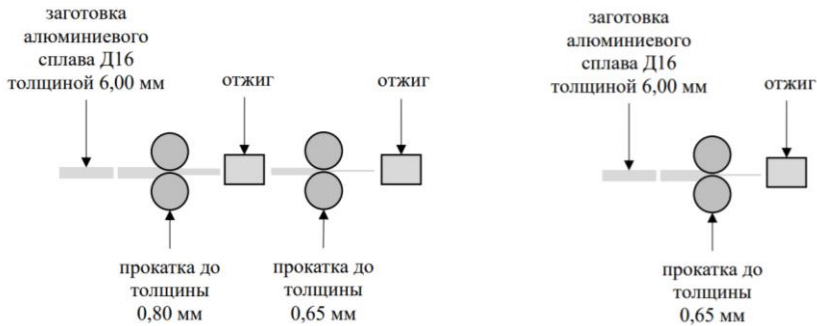
Рисунок 4 – Технологическая схема симметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16

Экспериментальные данные прокатки образцов алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ приведенные в третьей главе, 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 5 а.

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.

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 5 б.



а – с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$; б – с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/1,5$

Рисунок 5 – Технологическая схема асимметричной прокатки ленты из алюминиевого сплава Д16

Аналогичные схемы производства алюминиевых лент были разработаны для сплавов АМг6 и АД33. 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. 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.

Технологическая схема повышения пластичности алюминиевого сплава Д16 при асимметричной прокатке с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$ представлена на рисунке 6. Разработана технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки, позволяющая получать алюминиевые ленты из сплава Д16 конечной толщиной 0,50 мм (рисунок 7).

Кроме того, 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 технологи-

ческим регламентом. Технологический регламент асимметричной прокатки алюминиевых лент лабораторно-промышленном стане дуо 400 регламентирует прокатку заготовок алюминиевого сплава Д16 следующих размеров: толщиной от 2,0 до 6,0 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.

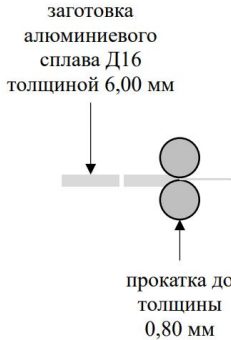


Рисунок 6 – Технологическая схема асимметричной прокатки алюминиевого сплава Д16 с отношением скоростей рабочих валков $V_1/V_2 = 10,0/2,0$

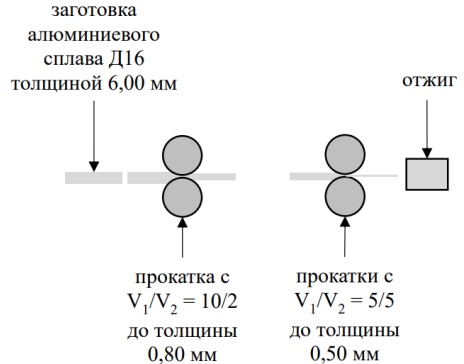


Рисунок 7 – Технологическая схема комбинирования асимметричной и симметричной прокатки алюминиевого сплава Д16

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 $(0,76...0,96) \cdot h_0/h_1$, 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. Жилияева». Разработанные технические решения применены в образовательном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. 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.

2. Песин, А.М. Особенности процесса аккумулирующей 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.

3. 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.

4. 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.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science:

1. 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 - 28 th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 2019. – p. 265-270.

2. 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.

3. Pesin, A. 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.

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

Публикации в иных изданиях:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Песин, А.М. Новые технические решения при асимметричной прокатке, созданные на кафедре технологий обработки материалов / А.М. Песин, О.Д. Бирюкова, **А.Е. Кожемякина** // 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.

5. 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. Ilina, A.K. Dubey, H.Y. Shahare // Материалы V международной молодежной научно-технической конференции. Под ред. А.Г. Корчунова. Magnitogorsk, 2020. – с. 71-72.

6. 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 меж-

дународной научно-технической конференции. Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), 2022. – с. 233.

7. Песин, А.М. Новые интересные результаты, полученные на новом прокатном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории Механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилаева / 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.

8. 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.