

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский Политехнический университет»

На правах рукописи

**ФАМ ВЪЕТ ХОАНГ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСЛОВИЙ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ С ЦЕЛЮ  
СТАБИЛИЗАЦИИ ТОЛЩИНЫ ПО ДЛИНЕ ЛЕНТ СПЛАВА АД33 И  
СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА**

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор.

**Шаталов Роман Львович**

Москва – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .	13
1.1 Современные технологические процессы прокатки полос и лент из алюминиевых сплавов .....	13
1.2 Анализ влияния контактного трения на деформации и напряжения при холодной прокатке полос.....	17
1.2.1 Деформационные показатели и напряжения при прокатке .....	17
1.2.2 Контактное трение при холодной прокатке.....	20
1.2.3 Влияние контактного трения на деформации и напряжения .....	28
1.3 Анализ методов определения среднего контактного давления на валки при продольной прокатке .....	30
1.4 Сопротивление металла деформации при холодной прокатке .....	35
1.5 Смазочные материалы для процессов прокатки.....	39
1.5.1 Анализ применения и влияния технологических смазок на показатели холодной прокатки полос .....	40
1.5.2 Анализ технологических смазок для холодной прокатки алюминиевых полос, листов и лент.....	44
1.6 Современные компьютеризированные программные системы моделирования процессов прокатки.....	47
Выводы по главе 1 и задачи исследования .....	49
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД33 КОНКРЕТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ.....	52
2.1 Определение химического состава образцов из алюминиевого сплава АД33 .	53
2.2 Исследование кривых напряжений при растяжении и механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава .....	55
2.2.1 Исследование механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава.....	58

2.2.2	Определение основных механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 по различным показателям твердости при холодной прокатке .....	62	
	Выводы по главе 2.....	69	
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК НА ПРОЦЕСС ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД33 И АМц.....			71
3.1	Экспериментальные исследования влияния технологических смазок на деформационные и силовые показатели при прокатке по длине полос из алюминиевых сплавов .....	71	
3.1.1	Влияние технологических смазок на силовые и деформационные показатели основной части полосы.....	75	
3.1.2	Влияние технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких алюминиевых полос.....	77	
3.2.	Усовершенствование моделей контактного давления для повышения точности расчета сил прокатки по длине тонких алюминиевых полос и лент.....	84	
3.3	Решение задачи снижения энергосиловых параметров прокатки с применением технологическим смазок .....	93	
	Выводы по главе 3.....	98	
ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД33 В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО СТАНА 175x300 .....			101
4.1	Компьютерное моделирование процесса прокатки лент из алюминиевого сплава АД33.....	101	
4.2	Влияние технологических смазок на энергосиловые показатели процесса прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 при моделировании .....	104	
	Выводы по главе 4.....	107	
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА АД33 НА ПРОМЫШЛЕННОМ ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ 175x300 .....			109
5.1.	Анализ технологии прокатки, характеристик стана 175x300 и требований к		

качеству лент .....	109
5.2. Исследование, проектирование и опробование рациональных режимов прокатки точных лент из алюминиевого сплава АД33 на промышленном двухвалковом стане 175х300 с технологическими смазками. ....	111
Выводы по главе 5.....	120
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ .....	121
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	139

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Создание эффективных производств качественного листового проката из легких и тяжелых цветных металлов остается актуальным на предприятиях металлургии и машиностроения.

На промышленных станах прокатка полос и лент из стали и цветных металлов проводится с применением технологических смазок и смазочно-охлаждающих жидкостей, на основе различных минеральных и растительных масел. Прокатка в стальных валках с применением различных технологических смазок приводит к не одинаковому влиянию на силу, момент и мощность прокатки, а также размеры полос и лент. Во Вьетнаме на металлургических и машиностроительных заводах в основном работают листовые прокатные станы первого поколения. Эти станы не оснащены системами контроля сил прокатки и САРТ, что затрудняет обеспечение точности и стабилизацию толщины по длине лент. На машиностроительных заводах Вьетнама на двухвалковых станах прокатывают тонкие ленты из алюминиевого сплава АД33, которые используются для листовой штамповки точных деталей. Однако технологические режимы прокатки не обеспечивают заданную точность толщины по длине лент. Поэтому, экспериментальная оценка влияния технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких полос из алюминиевого сплава АД33 конкретного химического состава, особенно актуальна для усовершенствования технологии прокатки лент и снижения нагрузок на оборудование на двухвалковом стане 175x300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам).

На металлургических заводах России и машиностроительных предприятиях Вьетнама прокатывают полосы и ленты из алюминиевого сплава АМц. Листовые заготовки из этого коррозионно - стойкого сплава широко применяются для глубокой вытяжки точных деталей. Механические свойства сплава АМц известны. Однако влияние технологических смазок на силовые показатели и

формирование толщины лент при холодной прокатке исследовано недостаточно подробно.

В большинстве опубликованных работ подробно исследовано влияние условий контактного трения на интегральные силовые показатели при горячей и холодной прокатке полос, которые используются в методах расчета и проектирования технологий и систем автоматизации. Однако, изменение коэффициента и сил трения, в частности за счет изменения смазочных материалов валков влияет на силу прокатки и формирование размеров по длине полос и лент, что недостаточно исследовано.

Анализ применения известных уравнений для расчета давления металла на валки показал, что при сравнении расчетных результатов с измеренными величинами ошибки определения сил прокатки составляют до 30%, особенно в установившийся период деформирования тонких полос и лент. Поэтому актуальными являются не только эксперименты по влиянию технологических смазок на качество полос, деформационные и силовые показатели, но и теоретические исследования и усовершенствования методики и уравнений для повышения точности и надежности расчета давления и силы прокатки по длине полос.

В процессе холодной прокатки полос и лент механические свойства металлов изменяются при изменении их деформационных показателей. Определение изменения механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава позволяет повысить точность расчета силовых параметров процесса листовой холодной прокатки. Установление взаимосвязей между основными механическими свойствами и показателями твердости при прокатке, обеспечивают возможность определять сопротивление металла деформации (предел текучести) по твердости. Наличие адекватных уравнений для расчета изменения показателей механических свойства по обжатию позволяет с использованием автоматизированных систем проектировать рациональные технологические режимы прокатки полос из алюминиевых сплавов на промышленных станах.

Энергоемкость является одной из основных характеристик технологических процессов, т.к. энергетические затраты составляют ощутимую статью общих затрат на производство листового проката. Актуальным вопросом является создание условий обеспечивающих снижение энергосиловых параметров прокатки. Эта задача может быть решена экспериментально обоснованным выбором и применением эффективных технологических смазок при прокатке.

Таким образом, исследование и применение технологических смазок имеет актуальное значение для повышения эффективности производства и качества листового проката.

**Цель работы.** Выравнивание толщины по длине лент из алюминиевых сплавов и снижение энергосиловых показателей процесса прокатки.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **задачи:**

1. Анализ эффективности применяемых технологических смазок на листовых станах российских и вьетнамских заводов для снижения нагрузок на оборудование и улучшения качества полос и лент из алюминиевых сплавов.

2. Экспериментальное исследование эффективности влияния различных технологических смазок на показатели процесса холодной прокатки по длине тонких полос и лент из алюминиевых сплавов АД33 и АМц.

3. Уточнение закономерностей изменения прочностных и пластических характеристик от степени деформации и зависимостей основных механических свойств от показателей твердости прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава.

4. Построение уравнений расчета сопротивления деформации и механических свойств алюминиевого сплава АД33, которые позволяют адекватно определять силовые и деформационные параметры холодной листовой прокатки.

5. Уточнение методики и усовершенствование алгоритма расчета напряжений и среднего давления на концевых участках и основной части тонкой полосы, которые позволяют повысить точность определения силовых показателей процесса прокатки.

6. Компьютерное моделирование процесса прокатки тонких полос для исследования не контролируемых переменных, уточнения математической модели контактного давления и режимов листовой прокатки с технологическими смазками.

7. Использование результатов компьютерного моделирования, инженерных расчетов и лабораторных экспериментов для разработки и внедрения рациональных режимов прокатки с технологическими смазками лент из алюминиевого сплава АД33, обеспечивающих сокращение времени на деформацию и снижение расходов на электроэнергию на стане 175x300 машиностроительного завода в городе Донг Най во Вьетнаме.

### **Научная новизна.**

1. Установлены закономерности изменения механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения алюминиевого сплава АД33 известного химического состава от степени деформации при холодной прокатке.

2. Получено уравнение расчета сопротивления деформации алюминиевого сплава АД33 известного химического состава, позволяющее исследовать и проектировать режимы листовой прокатки на действующих промышленных агрегатах.

3. Получены регрессионные уравнения, связывающие предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение алюминиевого сплава АД33 конкретного химического состава с показателями твердости по Виккерсу и Бринеллю, позволяющие расширить область применения неразрушающих методов контроля механических свойств проката.

4. Впервые установлены закономерности влияния условий контактного трения на формирование деформационных, силовых показателей прокатки и толщину тонких полос и лент из алюминиевых сплавов АД33 и АМц в периоды неустановившихся и квазистационарных условиях деформирования.

5. Получены количественные закономерности влияния технологических смазок на неравномерность распределения силы прокатки, относительного

обжатия и толщины по длине полос и лент при холодной прокатке алюминиевых сплавов.

6. Выполнен количественный анализ адекватности применения коэффициента напряженного состояния предложенного М.Д. Стоуном в моделях расчета давления и силы прокатки тонких полос из алюминиевых сплавов.

7. Усовершенствованы модель и алгоритм расчета давления и силы прокатки по длине лент при холодной прокатке, отличающиеся учетом влияния условий контактного трения на концевых участках, а также внешних частей на очаг деформации при прокатке основной части раската, что повышает точность определения среднего давления при прокатке лент из сплавов типа АД33.

#### **Материалы, оборудование и методы исследования.**

1. Химический состав опытных полос из алюминиевого сплава АД33, полученных с машиностроительного завода в г. Донг Най (Вьетнам), определялся методом оптико-эмиссионным спектральным с использованием аналитического прибора PMI-MASTER.

2. Опытную прокатку полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц проводили с обжатиями  $\epsilon$  от 10 до 50% в сухих валках и с различными смазками: пальмовое масло, смазка прокатная (СПЗ) 6%, индустриальное масло (И40) 5%, подсолнечное масло 5%, керосин на лабораторном двухвалковом стане 150x235, оснащенной микроконтроллерной системой контроля силы прокатки в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского политехнического университета. До и после прокатки измерили размеры полос по длине в трех точках, а также по всей длине с шагом 10мм электронным штангенциркулем с точностью  $\pm 0,01$  мм. В процессе прокатки автоматически измеряли силу прокатки по длине полос с точностью  $\pm 0,01$ кН. Данная система контроля позволяет измерять силу прокатки под левым и правым нажимными винтами, вычислять суммарное значение с заданной частотой по длине полосы, определять максимальное значение, отображать информацию на цифровых приборах и передавать данные через USB порт на персональный компьютер для дальнейшей обработки данных или печати результатов измерений и расчетов на принтере.

3. Из отожженных и прокатанных полос были подготовлены образцы и проведены испытания на растяжение для определения предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения на универсальной испытательной машине фирмы Zwick/Roell Z250.

4. Выполнили измерения твердости по Виккерсу (HV) твердомером МЕТКОН DUROLINE МН-6 образцов из отожженных и прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33.

5. Создание 3D моделей для последующего моделирования процессов продольной прокатки с помощью Autodesk Inventer. Моделирование процессов продольной прокатки полос осуществляли с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа QForm.

#### **Практическая значимость и реализация работы.**

1. Разработаны и опробованы рекомендации по усовершенствованию режимов прокатки лент из алюминиевых сплавов с различными смазками валков на промышленном стане 175x300 машиностроительного завода в городе Донг Най во Вьетнаме для листовой штамповки точных деталей, что позволяет сократить время на холодную прокатку и снизить расход на электроэнергию в производстве.

2. Разработано научно-методическое описание и подготовлена лабораторная работа, для проведения исследований на двухвалковом стане 150x235 по влиянию технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и качество алюминиевых полос, которые используются при преподавании дисциплины «Теория и технология прокатки» на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета, а также в учебном процессе при проведении лабораторных и практических занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением» университета Чан Дай Нгхиа во Вьетнаме.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты реологических исследований алюминиевого сплава АД33 известного химического состава и определение механических свойств

алюминиевого сплава АД33 до и после прокатки с обжатиями 10, 20, 30, 40, 50%. Зависимости основных механических свойств от твердости и связи между механическими показателями при холодной прокатки полос из алюминиевого сплава АД33.

2. Анализ влияния различных технологических смазок на деформационные, силовые, энергосиловые показатели и толщину по длине полос при холодной прокатки алюминиевых сплавов на лабораторном двухвалковом стане 150x235 и лент на промышленном стане 175x300.

3. Количественные закономерности влияния технологических смазок на неравномерность распределения силы прокатки, относительного обжатия и толщину по длине тонких алюминиевых полос и лент.

4. Усовершенствованная модель и алгоритм расчета давления и силы прокатки по длине тонких полос при холодной прокатке.

5. Компьютерное моделирование и определение не контролируемых параметров холодной прокатки по длине полос из алюминиевого сплава АД33 с различными технологическими смазками с помощью программа QForm 3D.

6. Разработка рациональных режимов прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 на промышленном двухвалковом стане 175x300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най во Вьетнаме.

**Достоверность результатов работы.** Достоверность результатов исследования базируются на использовании методов математического моделирования, современных вычислительных систем и методик, и подтверждена в ходе экспериментальных исследований на оборудовании кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета. Результаты проверены при опытной прокатке алюминиевых лент на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме.

Автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью сервиса «Антиплагиат» - <http://nitumisis.antiplagiat.ru>.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- VI международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» – Донецкий Национальный Технический Университет. (Донец. 26/5/2020);

- Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2021» - Московский Политехнический Университет. (Москва. 26/3/2021);

- Третья международная научно-техническая конференция «Павловские чтения». (Москва. 27/5/2021);

- V международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация». (Санкт-Петербург. 27/1/2022);

- XIII Международный конгресс прокатчиков, ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина (Москва, 25-27 октября 2022г).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 11 печатных работах, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук; 5 статей в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 139 страницах, состоит из введения, 5 глав, основных выводы, списка литературы, включающего 136 источников и 3 приложений. Диссертация содержит 65 рисунков и 13 таблиц.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Современные технологические процессы прокатки полос и лент из алюминиевых сплавов

Алюминий по распространенности на земле является вторым металлом после железа и третьим элементом после кислорода и кремния [1]. Впервые металлический алюминий был получен в 1825 году датским физиком Г. Х. Эрстед [1, 2]. Алюминий и алюминиевые сплавы используются в машиностроении, строительстве, металлургии, электротехнике и других отраслях промышленности [3-6]. Без алюминия аэрокосмическая индустрия никогда не получила бы развития. Алюминий необходим для производства автомобилей, вагонов скоростных поездов, морских судов. Самые разнообразные виды продуктов из алюминия используются в современном строительстве. Алюминий является основным материалом для высоковольтных линий электропередачи. Примерно половина посуды для приготовления пищи, продаваемой каждый год во всем мире, сделана именно из этого металла. Невозможно представить магазин без алюминиевых банок для напитков и аптеку без лекарств, упакованных в алюминиевую фольгу [7]. Механические свойства деформируемых сплавов в основном зависят от степени деформации и химического состава [2]. Алюминий может быть дополнительно упрочнен путем обработки – горячей прокатки или холодной прокатки. Некоторые сплавы становятся прочнее путем термообработки с последующим быстрым охлаждением. Этот процесс затормаживает атомы на месте, упрочняя конечный металл. Большая часть алюминия “обрабатывается холодным способом” - обычно прокаткой, прессованием или волочением - чтобы сделать его прочнее. Эти технологические процессы изменяют размеры и механические свойства полуфабрикатов.

За последние 100 лет алюминиевая промышленность эволюционировала от ограниченного производства сплавов и изделий до крупносерийного производства

широкого спектра продукции. В 1999 году производство алюминия в США включает примерно 5,6 миллиона тонн плоского проката, 1,7 миллиона тонн экструзии и труб и 2,4 миллиона тонн слитков/отливок [8]. Эти продукты используются на самых разных рынках, включая строительство, транспортировку и упаковку. Рынки также существуют для таких продуктов, как электрические проводники (ЕС), поковки, стержни, проволока, прутки, порошки и пасты, как показано в категории “прочее” на рисунке 1.1 [9].

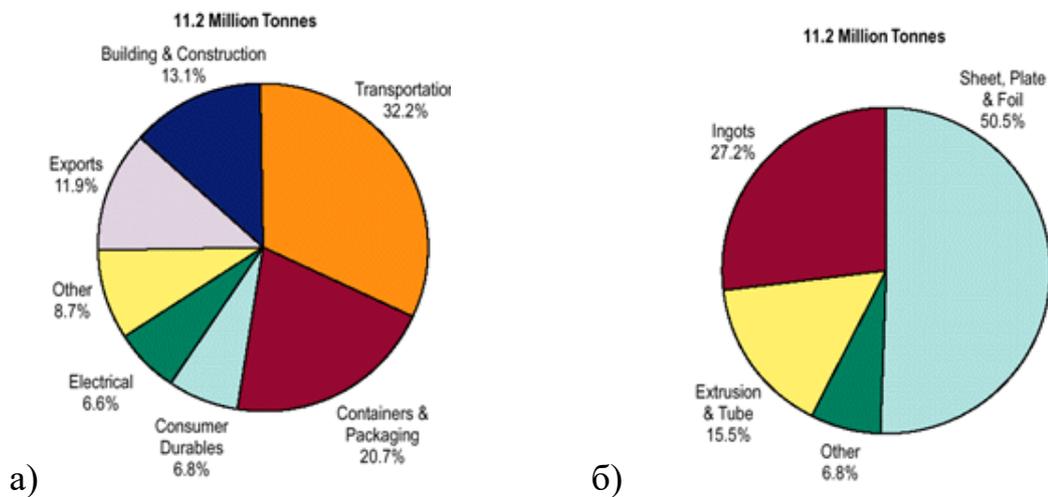


Рисунок 1.1 – Распределение поставок алюминия по основным рынкам (а-вверху) и видам продукции (б-внизу) на основных рынках США (на основе информации за 1999 год) [8]

Мировое производство алюминиевых деформированных полуфабрикатов: листов, полос, лент, профилей, прутков и фольги в 2013г достигло около 45 млн т/г. Основные производители Китай – более 20 млн/г и Россия более 4 млн т/г [10]. В 2017г мировое производство алюминия достигло 63,5 млн. тонн. Лидером по-прежнему остается Китай – до 36,4 млн. тонн [11].

Производство алюминия мира год за годом увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом. Так в период с 2009 по 2016 год мировой рынок алюминия вырос на 30 % [11, 12]. Несмотря на колебания мировой экономики 2017 году оказано положительное влияние на алюминиевую отрасль. Мировой спрос на алюминий по итогам 2017 года вырос на 6 % по сравнению с предыдущим годом благодаря экономическому росту в крупнейших регионах

мира, включая Китай, Европу и Северную Америку. В результате уверенного роста спроса дефицит на мировом рынке алюминия составил 0,6 млн. тонн в 2017 году и, по оценкам, увеличится до 1,7 млн. тонн в 2018 году. Мировой рост потребления на алюминий поддержан, прежде всего быстрым экономическим развитием и урбанизацией Китая, доля которого в общем объеме мирового потребления составляет более 50% [11, 13] и за последние 25 лет мировое потребление алюминия выросло более чем в 2,6 раз, в то время как потребление алюминия промышленными предприятиями в России и странах СНГ снизилось на треть [7]. По данным Алюминиевой Ассоциации, загрузка мощностей по производству алюминиевого проката в РФ в 2018 году составила около 79% (+3 п. п. по сравнению с предыдущим годом). По расчетам АКРА (Аналитическое Кредитное Рейтинговое Агентство), суммарное внутреннее потребление алюминия в РФ в 2019 году превысит 1 млн т [7].

Алюминий и сплавы на его основе очень легко поддаются обработке давлением, обладают небольшим весом, не разрушаются во время обработки. Наибольшую популярность получил следующий прокат алюминия: фольга, лента, тонкие листы, толстые листы и шины. В России производство алюминиевого проката регулируется государственными стандартами. Основные законодательные нормативы — это ГОСТ 21631, ГОСТ 21488–97 [14-15] и другие.

В РФ развиваются два вида заводов, использующих в процессе прокатки алюминия и его сплавов: кабельные заводы, производящие проволоку и заводы «по обработке цветных металлов», которые производят полосы, ленты, листы, профили, трубы и другую продукцию [16-19].

С середины XX века начали использовать современные конструкции прокатных станов [20-23]. В работе [22] подробно исследовано использование технологических смазок при холодной прокатке стальных полос. В работах [24-31] исследованы особенности процесса деформации при прокатке тонких полос.

Компактные агрегаты непрерывного литья и прокатки широко используются со второй половины XX века. Существуют много различных

источников, в которых подробно рассмотрены эти процессы, например, в монографии [17].

Лучшим вариантом прокатки алюминия является тот, при котором прокатка совмещена с процессом непрерывного литья, так как при этом достигается высокая производительность и существенно снижаются энергозатраты. На рисунке 1.2 показана схема литейно-прокатного агрегата на заводе «Электросталь» [32-34].

ЛПА-АК8П конструкции ВНИИМЕТМАШ, применяемого для получения алюминиевой катанки со средней производительностью 8 т/ч. Агрегат имеет в своем составе роторную литейную машину для получения заготовки трапецевидного сечения площадью 3300 мм<sup>2</sup> и прокатный стан с 12 чередующимися двухвалковыми рабочими клетями, расположенными в две группы. При прокатке используется калибровка овал- круг, а диаметр выпускаемой катанки колеблется от 9 до 19 мм. Суммарная установленная мощность электродвигателей составляет 1500 кВт [32].

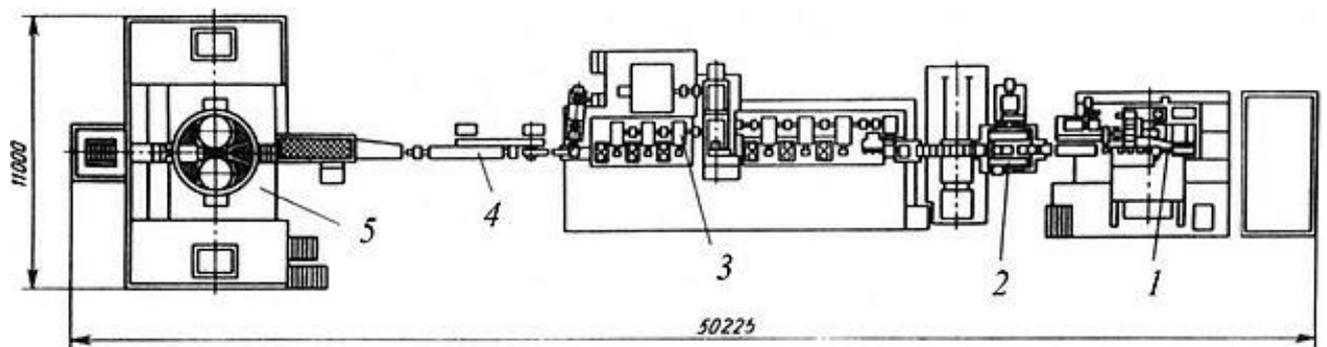


Рисунок 1.2 – Схема литейно-прокатного агрегата [32-33].

- 1 - литейная машина; 2 - линия транспортировки заготовки;  
3 - прокатный стан; 4 - участок охлаждения катанки; 5 – моталка

Еще в пятидесятых годах, в СССР предпринимались успешные попытки с целью совмещения непрерывного литья на трактовых литейных машинах с прокаткой. Но более рентабельными оказался агрегат с трактовым кристаллизатором по производству алюминиевых полос «Алюсюнсе» (Швейцария), остановленный на заводе фирмы «Ляйхтметалл» в городе Эссен и

получивший название «Кастер-2». Производительность агрегата составила двадцать тонн в час [32].

Развитие технологии прокатки будет поддерживаться фундаментальными технологиями компьютерного управления, численного анализа, нагрева, контроля масштаба, производства и использования валков и инструментов, смазки прокатки, охлаждения, измерения и т.д. Достижения в этих областях могут следовать к значительным инновациям в широком спектре областей. Кроме того, ожидаются дальнейшее развитие компьютерного контроля и численного анализа по мере дальнейшего расширения возможностей компьютеров и совершенствования теории анализа. Разработка новых технологий прокатки, деформирующего инструмента и научно обоснованного применения смазки необходима для повышения производительности и качества продукции во все более жестких условиях прокатки.

## 1.2 Анализ влияния контактного трения на деформации и напряжения при холодной прокатке полос

### 1.2.1 Деформационные показатели и напряжения при прокатке

По пластической теории, взаимосвязь между напряжением и деформацией при пластической деформации:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{D} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{D} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{D} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

где  $D$  - модуль пластичности (всегда меняется во время деформации)

Условие текучести, предложенное Треска-Сен и Хубер-Мизес:

$$\text{по Треску-Сену: } \left. \begin{aligned} |\sigma_1 - \sigma_2| &= \sigma_s = 2k \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &= \sigma_s = 2k \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &= \sigma_s = 2k \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

по Хуберу-Мизесу:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{xz}^2 + 6\tau_{yz}^2 = 6k^2, \quad (1.3)$$

где  $k$  - предел текучести при сдвиге. Из условия (1.2)  $k = 0,5\sigma_s$  и условия (1.3)  $k = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_s$ .

В упругом состоянии равновесие может происходить при любых условиях внешней силы. Но в пластическом состоянии равновесие возникает только при определенных внешних условиях. Теоретические основы деформации подробно представлены в работах [28, 35-36] и в работах [28, 36-43] по применению теории деформации при обработке давлением.

В работе [44] показано, что деформационные показатели при листовой прокатке — это физические и математические модели очага деформации (зона воздействия валков на металл) (рис. 1.3)

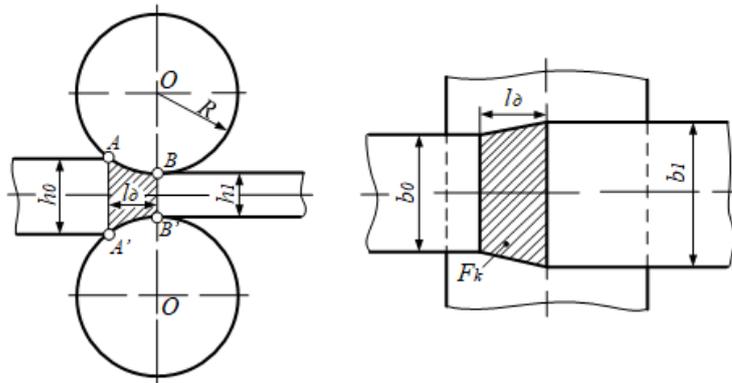


Рисунок 1.3 – Схемы очага деформации при продольной прокатке

Рассмотрим схему очага деформации при прокатке. На основе анализа работ И.М. Павлова, А.И. Целикова, П.И. Полухина и В.С. Смирнова, деформационные показатели при прокатке включают:  $\Delta h = h_0 - h_1$  - абсолютное обжатие полосы ( $h_0, h_1$  - толщина по длине полос до и после прокатки);  $\alpha = \sqrt{\Delta h / R}$  - угол захвата;  $l_d = \sqrt{R \Delta h}$  - длина дуги захвата;  $b_1 = b_0 + \Delta b$  - ширину полосы после прокатки;  $\Delta b = (0,4 \cdot \Delta h \cdot l) / h_0$  - величина уширения по уравнению Э. Зибеля;  $\lambda = l_1 / l_0$  - вытяжка полосы;  $\beta = b_1 / b_0$  - показатель уширения;  $\varepsilon = \Delta h / h_0$  - относительное обжатие полосы.

Пластическая деформация металлов и сплавов возникает при схеме плоского деформирования в условии:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot k_f, \quad (1.4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;

$\beta$  – коэффициент, зависящий от величины среднего главного нормального напряжения  $\sigma_2$ ; и при листовой прокатке  $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ ,  $\beta = 1,15$  и  $k_f = \sigma_s$  [45].

На рисунке 1.4 представлено напряженное состояние при прокатке. Основное уравнение равновесия элементарного объема, находящегося в зоне деформации при прокатке, имеет следующий вид:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{p_x - \sigma_x}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_x}{y} = 0, \quad (1.5)$$

где  $p_x$  – нормальное контактное напряжение;

$\sigma_x$  – среднее нормальное напряжение сжатия в зоне деформации;

$\tau_x$  – касательное контактное напряжение, вызванное силами внешнего трения;

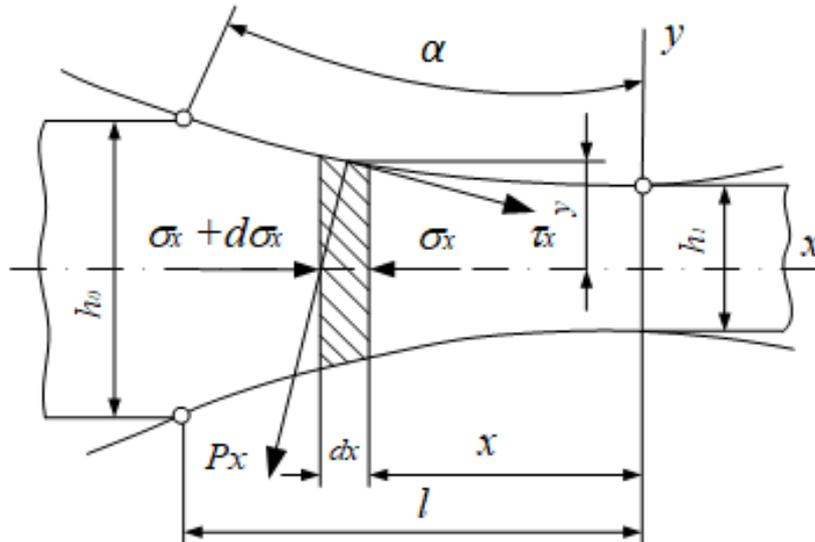


Рисунок 1.4 – Схема напряженного состояния при продольной прокатке

Считая, что  $\sigma_1 = p_x$ ,  $\sigma_3 = \sigma_x$ ,  $\sigma_2 = (p_x + \sigma_x) / 2$  и  $p_x - \sigma_x = 1,15k_f = k$ . Получаем основное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d(p_x - k)}{dx} - \frac{k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_x}{y} = 0, \quad (1.6)$$

При решении уравнение (1.6) по современной теории прокатке, получаем величину удельной силы трения  $\tau_x$ , равной: в первом случае  $\tau_x = \mu p_x$ ; во втором  $\tau_x = \text{const}$ ; в третьем  $\tau_x = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$ , где  $\eta$ - коэффициент вязкости смазочного материала.

Обычно чаще всего принимают условие  $\tau_x = \mu p_x$  [45].

При холодной прокатке, из-за отношения диаметра рабочих валков к толщине полосы являются весьма большими, поэтому процесс прокатки считают так же, как процесс осадки. Таким образом, в очаге деформации толщина полосы  $h = \frac{h_0 + h_1}{2}$  принимается постоянной и напряженное состояние представлено на рисунке 1.5

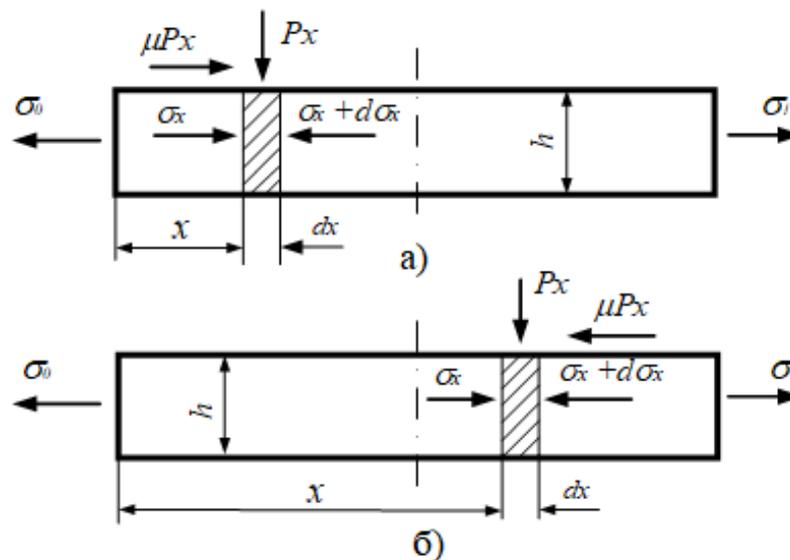


Рисунок 1.5 – Схема напряженного состояния при сравнении процессов прокатки с осадкой: а – зона отставания; б – зона опережения [45]

### 1.2.2 Контактное трение при холодной прокатке

По [46], качество поверхности металла определяется трением, смазкой и рядом поверхностных явлений на всех операциях производства холоднокатаного листа. Трение определяет силовые условия процесса, формирование микрогеометрии поверхности, износ и охлаждение валков и роль его показана на

рисунке 1.6

Силовые условия прокатки определяются фрикционными параметрами трения, от которых зависят толщина прокатываемой полосы, точность прокатки и необходимая мощность оборудования [46].

Известно, что силы трения, возникающие между прокатываемым металлом и валками, оказывают большое влияние на процесс прокатки. Без них невозможно его осуществление, силы трения определяют допустимый угол захвата, а, следовательно, возможное обжатие и кроме того, влияют на энергосиловые параметры, уширение и опережение [47].



Рисунок 1.6 – Роль трения при прокатке [46]

Между трущимися поверхностями практически всегда находятся в том или ином количестве различные вещества, отличающиеся по своим свойствам от основных взаимодействующих тел. Природа трения существенно зависит от

состава и количества этих промежуточных веществ. Очень большое влияние на процесс трения оказывают смазки. В зависимости от толщины разделительного слоя смазки различают три основных вида трения: сухое, граничное и жидкостное (рис. 1.7). Принято выделять также смешанные виды трения: полусухое и полужидкостное [48].

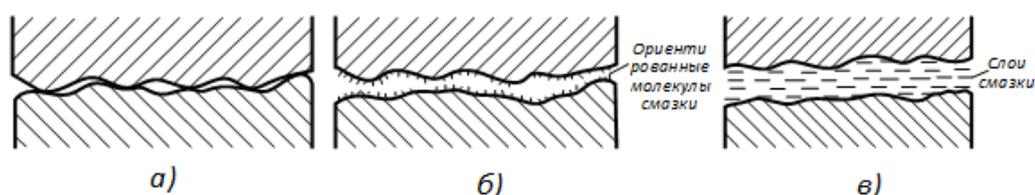


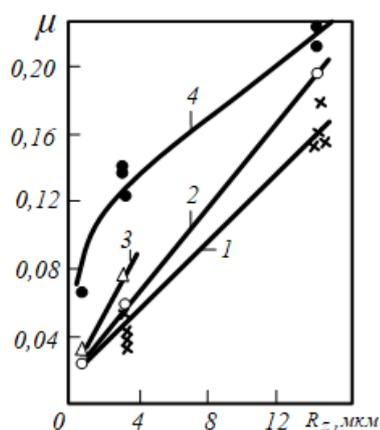
Рисунок 1.7 – Схемы контактирования поверхностей при сухом (а), граничном (б) и жидкостном (в) трении [48]

Одним из наиболее важных контролируемых параметров, определяющих процесс деформации при прокатке полосы, является внешнее трение между валками и деформируемым металлом или сплавом. Наличие трения и величина сил трения определяют захватывающую способность валков, в том числе при листовой прокатке в стационарном состоянии они влияют на степень деформации по толщине и уширение металла при прокатке. Силы внешнего трения, требующие дополнительной работы для их преодоления, вызывают увеличение сопротивления и энергии деформации.

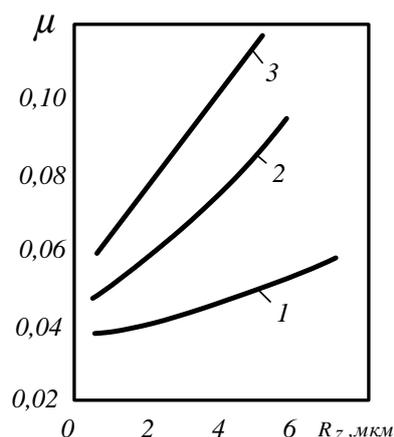
Известно, что в процессах прокатки усилия и моменты на шпинделях могут изменяться в весьма широких пределах.

Влияние шероховатости поверхности валков и полосы на коэффициент трения:

В работе [48] показывают, что при проведении эксперимента по холодной прокатке стали 08кп на стане 180 толщиной от 0,5–0,6 мм, исследовали влияние на коэффициент трения шероховатости полосы и двух технологических смазок (касторовое масло и эмульсол Э-1). Результаты показаны на рисунке 1.8.



а- зависимость коэффициента трения от шероховатости поверхности валков:  
1,2,3- прокатка с касторовым маслом, обжатие 10, 25, 40% соответственно;  
4- прокатка с эмульсией, обжатие 25%;



б- влияние шероховатости поверхности полос на коэффициент трения при холодной прокатке с касторовым маслом. Обжатие  $\epsilon$ , %:  
1–10%; 2–30%; 3–50%

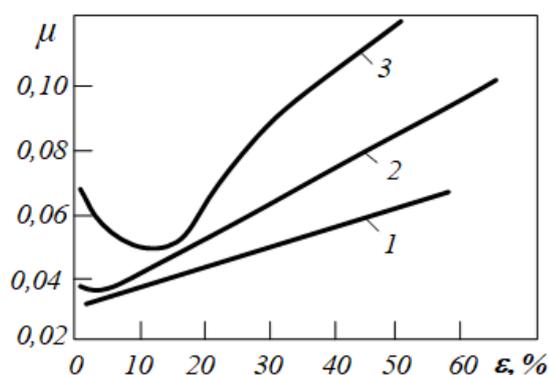
Рисунок 1.8 – Влияние шероховатости поверхности валков и полосы на коэффициент трения [48].

По результатам исследования установлено существенное влияние шероховатости поверхности валков и полосы на коэффициент трения качения: чем ниже шероховатость поверхности, тем ниже коэффициент трения. Для разных типов смазок значение (величина) коэффициента трения от шероховатости поверхности также отличается. Причем с увеличением показателя поверхности стальной полосы с 2 до 6 мкм при прокатке с обжатием 30% коэффициент трения возрастает почти в 2 раза с 0,05 до 0,10 (см. рис. 1.8). Обычно влияние шероховатости алюминиевых полос на условия контактного трения исследовано недостаточно.

Зависимость коэффициентов трения от обжатия при прокатке:

В работе [48] приведена зависимость коэффициента трения от относительного обжатия и состава поверхности полосы и валков. Рассмотрим результаты исследований шероховатых ( $\nabla 8a$ ) валках (рис. 1.9). Указывается, что при прокатке образцов с относительно гладкой поверхностью (кривые 1 и 2)

наблюдается почти прямолинейное повышение коэффициента трения по мере увеличения обжатия. Чем грубее поверхность полосы, тем интенсивнее растет коэффициент трения. Своеобразный характер имеет зависимость  $\mu = f(\varepsilon)$  при прокатке образцов с грубой поверхностью (кривая 3): при увеличении обжатия коэффициент трения сначала уменьшается, достигает минимального значения при  $\varepsilon = 10-15\%$ , а затем интенсивно почти прямолинейно возрастает (рис.1.9).



Поверхность образцов:  
 1- полированная образцы;  
 2- шероховатая;  
 3-грубошероховатая.

Рисунок 1.9 – Зависимость коэффициентов трения от обжатия при прокатке наклепанных образцов на шероховатых валках с касторовым маслом. [48].

Зависимость коэффициента внешнего трения от удельного давления:

Удельное давление на контактную поверхность влияет на коэффициент трения из-за связанной с ним утечки абразивного материала. Если абразивный продукт всегда удаляется с контактной поверхности, давление увеличивает силу трения, но оставшийся продукт увеличивает силу трения. При смазке увеличивается удельное давление, уменьшается коэффициент трения (рис.1.10). Как и в случае сухого трения, абразивные продукты удалить нельзя, поэтому эти продукты считаются смазочными материалами, которые затем становятся полусухим трением. Влияние единичного давления на коэффициент трения зависит от поглощения веществ на поверхности, поглощения смазочных материалов, в результате чего давление увеличивается, а коэффициент трения уменьшается.

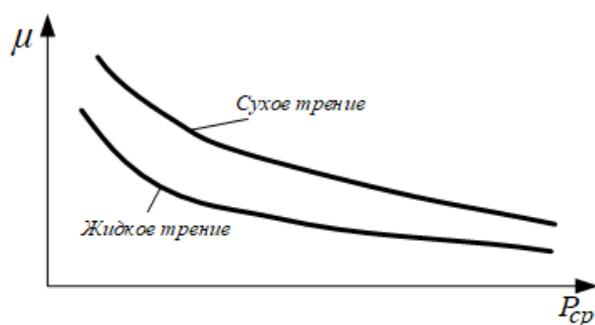


Рисунок 1.10 – Влияние удельного давления на коэффициент трения

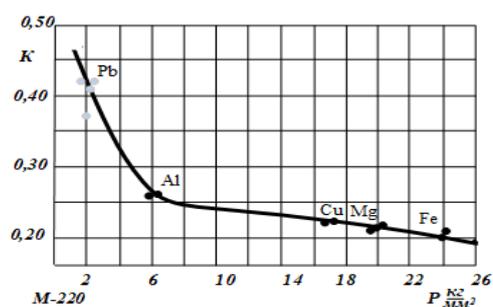


Рисунок 1.11 – Зависимость коэффициента внешнего трения от удельного давления при прокатке алюминиевых покрышки [49]

Все опыты проводились в чугунных валках с постоянным обжатием в 0,5 мм. Опыты проводились в сухих и смазанных машинным маслом валках [49]. Результаты экспериментов (рис. 1.11) показывают, что при увеличении удельного давления в 13 раз, в диапазоне от 2 до 26  $кг/мм^2$  коэффициент трения уменьшается в 2,0 до 2,5 раз.

Влияние состава технологических смазок:

Смазочные материалы, используемые в процессе холодной прокатки, имеют эффект разделения трущихся поверхностей, в очаге деформации станет граничным и жидкостным трением, уменьшение коэффициента трения при использовании смазки зависит от толщины разделяющего масла и прочностного состава смазки. Различные смазочные материалы с разным химическим составом дают разную долговечность, кроме того, вязкость смазки, изученная в [48, 50, 51], показывает зависимость коэффициента трения от нее и показана на рисунке 1.12.

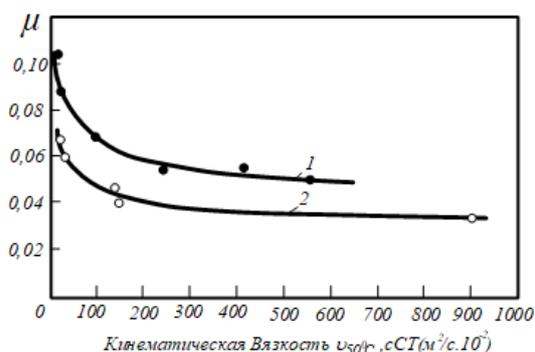


Рисунок 1.12 – Зависимость коэффициента трения от вязкости масла:

1- минеральные масла; 2- растительные масла.

В работах [52, 53] полосы из технически чистого алюминиевого сплава (1100-Н14) подвергали холодной прокатке с обжатием от 10 до 60%, смазывали с использованием минерального уплотнительного масла и различных граничных добавок: стеарилового спирта, стеариновой кислоты, лаурилового спирта и лауриновой кислоты. Коэффициенты трения, рассчитанные с использованием формулы Хилла, приведены на рисунке 1.13а для скорости прокатки 100 об/мин, что соответствует скорости на поверхности 1,309 м/с.

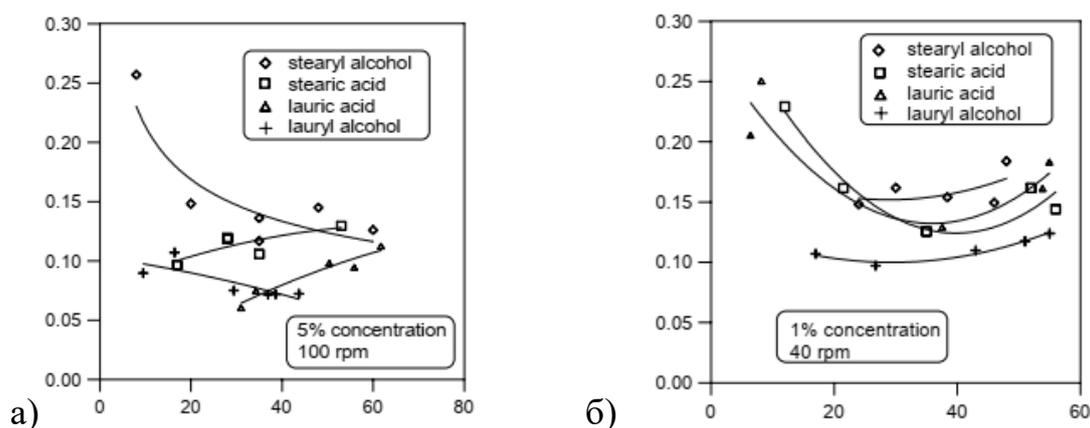


Рисунок 1.13 – Коэффициент трения как функция уменьшения при прокатке со смазкой алюминиевого сплава 1100-Н14;

а- 5% концентрация, 100 об/мин; б- 1% концентрация, 40 об/мин

На коэффициент трения, помимо уменьшения, влияет выбор граничной добавки. Для двух спиртов коэффициент падает с увеличением уменьшения. Когда используются кислоты, наблюдается обратное.

Изменение скорости прокатки и концентрации присадки в минеральном уплотнительном масле изменяет зависимость коэффициента трения от редукии. Два спирта по-прежнему вызывают снижение или практически неизменный коэффициент трения. Эффективность кислот сильно зависит от нагрузки и сопутствующего снижения - (см. рис. 1.13. б).

До настоящего времени существовало множество методов определения коэффициента трения при прокатке, некоторые из типичных методов, такие как: Метод максимального угла захвата; Метод принудительного торможения полосы; Метод крутящего момента; Комбинированный метод; Метод предельного

обжатия; Продвинутой метод; Метод давления и другие методы определения коэффициента трения: Методика Стоуна (Stone), С.И. Губкина и А. П. Грудева. Приведенные выше методы и формулы для расчета коэффициента трения изучаются давно. При расчете зависимости коэффициента трения от отдельных факторов учитывается только один или два фактора, влияющих на трение, что может привести к большим погрешностям.

А. П. Грудев на основании экспериментов предложил некоторые методы расчета коэффициентов трения, учитывающие основные существенные параметры процесса холодной прокатки, влияющие на его величину.

Методика расчета коэффициента трения по формуле А. П. Грудева [42, 48, 49] представлена в работах [54-56], по которой рассчитывается коэффициент трения:

$$\mu = K_{CM} \frac{1}{1+0,25\sqrt{\vartheta_{50}}-0,005\vartheta_{50}} (1 + 0,5R_z) \left[ 0,07 - \frac{0,1v_B^2}{2(1+v_B)+3v_B^2} \right], \quad (1.7)$$

где  $\vartheta_{50}$ - кинематическая вязкость смазки при  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;  $R_z$ - максимальная высота микронеровностей на поверхности бочки валка,  $\text{мкм}$ ;  $v_B$ -окружная скорость бочки валков,  $\text{м/с}$ ;  $K_{CM}$  -коэффициент, учитывающий влияние вида и состава смазки. Для растительных масел  $K_{CM}=1,0$ , для минеральных  $K_{CM}=1,4$ .

Формула (1.7) верна, если значение вязкости  $\vartheta_{50}$  находится в диапазоне 5-1000 сСт и шероховатости  $R_z$  находится в диапазоне 0,2-10  $\text{мкм}$  ( $\nabla 11$ - $\nabla 6$ ).

При шероховатости  $R_z$  в диапазоне 1,6-6,3  $\text{мкм}$  ( $\nabla 9$ - $\nabla 7$ ) на основании анализа экспериментальных данных А. П. Грудев предложил формулу для расчета коэффициента трения в следующем виде:

$$\mu = K_{CM} \cdot \frac{1 + (0,4 + 0,01\varepsilon)R_z}{1 + 0,25\sqrt{\vartheta_{50}} - 0,005\vartheta_{50}} \cdot \left( 0,07 - \frac{0,1v_B^2}{2(1+v_B)+3v_B^2} \right) \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon$ - относительное обжатие в долях единицы ( $\varepsilon > 10\%$ ).

По [57], при холодной прокатке, как и при любом другом процессе прокатки, энергия, необходимая для осуществления пластической деформации полосы валками, передается фрикционным путем. Поэтому захватывающая

способность валков, крутящие моменты, энергосиловые и кинематические параметры, а также устойчивость процесса прокатки определяются напряжениями (силами) трения на контактной поверхности металла с инструментом, количественной мерой которых служит коэффициент трения  $\mu$  [40 - 42, 48, 49]. Коэффициент трения влияет также на удельный расход электрической энергии при холодной прокатке и на качество поверхности выпускаемой продукции. Поэтому при разработке режимов деформации на промышленных станах холодной прокатки необходима точная и надежная информация о коэффициенте трения [55, 58-61].

Поэтому для снижения уровня энергетических параметров и удельного расхода электроэнергии, а также улучшения качества поверхности изделий и повышения технологической эффективности процесса холодная прокатка осуществляется с низкой величиной коэффициента трения.

### 1.2.3 Влияние контактного трения на деформации и напряжения

Рассматриваем напряжение трения при неустановившемся захвате и установившемся процессе прокатки (рис. 1.14).

Во многих исследованиях указывается, что касательное напряжение трения при неустановившемся захвате определяется по формуле  $\tau_1 = \mu \cdot p_{д1}$  и установившемся процессе  $\tau_2 = \mu \cdot p_{д2}$ , ясно, что  $p_{д1} < p_{д2}$ , следовательно  $\tau_1 < \tau_2$ .

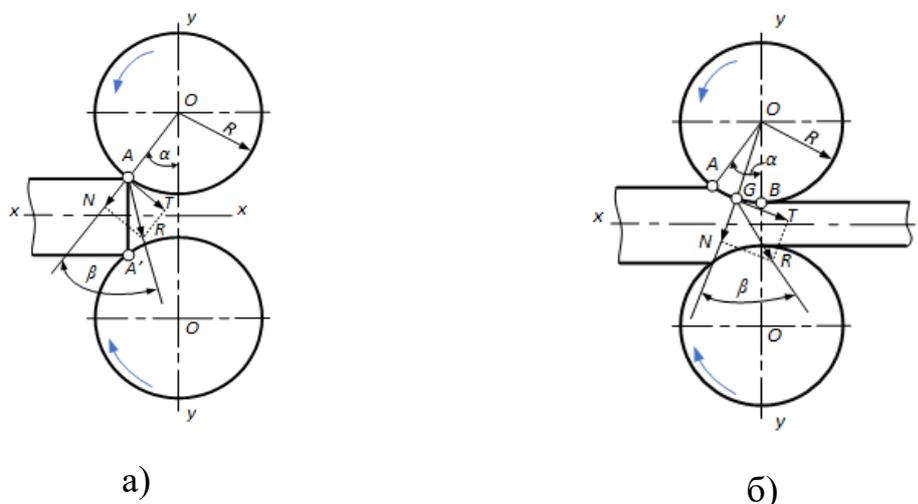


Рисунок 1.14 – Схема прокатки при неустановившемся захвате (а) и установившемся процессе (б)

В обработке металлов давлением, расчет касательных напряжений трения обычно используют две зависимости:

$$\text{по Прандтлю Зибелю:} \quad \tau_x = \mu_{TP.Зиб} \cdot \sigma_S, \quad (1.9)$$

$$\text{по Амонтону Кулону:} \quad \tau_x = \mu_{TP.К} \cdot p_d, \quad (1.10)$$

Распределение расчетной величины коэффициент трения по дуге захвата очага деформация:

$$\text{по Прандтлю Зибелю:} \quad \mu_{TP.Зиб} = \frac{\tau_x}{\sigma_S}, \quad (1.11)$$

$$\text{по Амонтону Кулону:} \quad \mu_{TP.К} = \frac{\tau_x}{p_d}, \quad (1.12)$$

где  $\tau_x$  – касательное напряжение;  $\sigma_S$  – сопротивление деформации;  $p_d$  – нормальное напряжение (давление).

Заметим, что  $\sigma_S < p_d$ , поэтому расчет сила прокатки  $P_z$  при расчете  $\mu_{TP.Зиб}$  по Зибелю больше от 1–2% чем  $P_K$  – сила прокатки при расчете  $\mu_{TP.К}$  по Кулону.

По методике подсчета касательных и нормальных напряжений трения, возникающие при прокатке широких полос между гладкими валками (двухмерная деформация) можно разделить на четыре различных вида прокатки (I, II, III, IV), отличающихся значениями показателя формы очага деформации  $l_d/h_{cp}$ : I –  $l_d/h_{cp} > 5$ ; II –  $l_d/h_{cp} = 2-5$ ; III –  $l_d/h_{cp} = 0,5-2$ ; IV –  $l_d/h_{cp} < 0,5$ .

Для этих видов прокатки характер деформации различен, и поэтому используются многими методами для расчета нормальных и контактных касательных напряжений. На рисунке 1.15 показана зависимость нормальных напряжений и контактных касательных от величины  $l_d/h_{cp}$ , а также от обжатия, угла захвата и коэффициента трения.

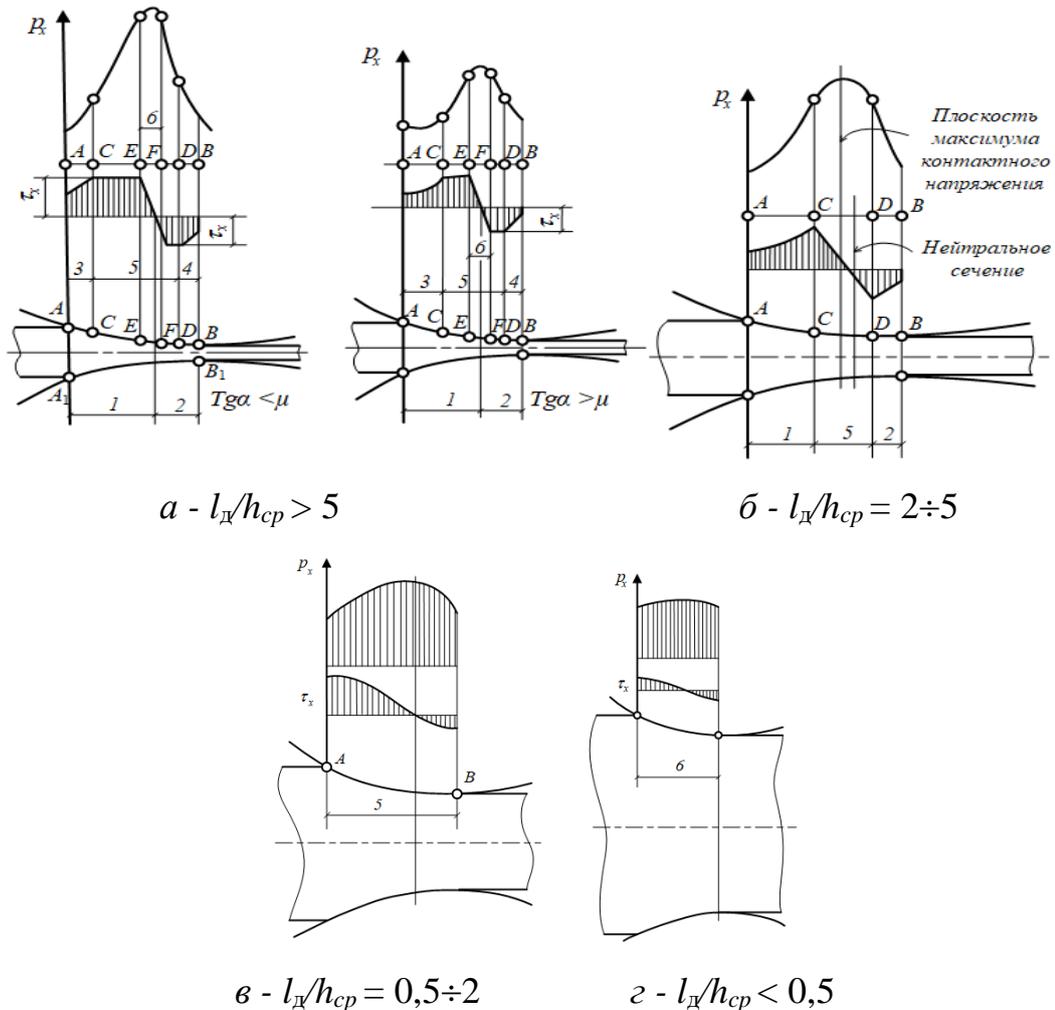


Рисунок 1.15 – График распределения контактных касательных и нормальных напряжений по дуге захвата: 1 – зона отставания; 2 – зона опережения; 3 – зона скольжения отставания; 4 – зона скольжения опережения; 5 – зона прилипания; 6 – участок заторможенной деформации.

### 1.3 Анализ методов определения среднего контактного давления на валки при продольной прокатке

При вычислении значения силы прокатки  $P$ , если рассматривать  $P$  как функцию с независимыми переменными, мы можем разделить на основные группы переменные: 1 - группа геометрии валков и полосы ( $R, h_0, h_1, b_1$ ); 2 - группа свойств, характеризующая условия контактного трения и сопротивления пластической деформации ( $\mu, \sigma_s$  - определяется экспериментально); 3-я группа внешних напряжений (натяжений) до и после деформации ( $\sigma_0, \sigma_1$ ), которые специально создаются и регулируются для обеспечения стабильного и

эффективного режима прокатки.

Сила прокатки в прикладных расчетах на участке полосы определяется по известному уравнению:

$$P = p_{cp} \cdot F_k, \quad (1.13)$$

где  $p_{cp}$  - среднее контактное давление металла на валки, Н/мм<sup>2</sup> (МПа);

$F_k$  – площадь (мм<sup>2</sup>) контакта металла с валком определяется длиной  $l_d$  и шириной  $b_{cp}$  очага деформации:

$$F_k = l_d \cdot b_{cp} = \sqrt{\Delta h \cdot R} \cdot b_{cp}, \quad (1.14)$$

где  $l_d$  - длина дуги захвата без учета упругого сжатия валков, мм;  $R$  - радиус рабочих валов, мм;  $b_{cp} = (b_0 + b_1)/2$  - средняя ширина полосы в очаге деформации ( $b_0, b_1$  – ширина полосы до и после прокатки), мм;

При определении среднего контактного давления на валки, в 1925 году Т. Карман предложил [62] дифференциальное уравнение в виде:

$$\frac{dp}{dx} - \frac{2k}{h} \frac{dh}{dx} - \frac{2\tau_n}{h} = 0, \quad (1.15)$$

где  $p$  - контактного давления на валок;  $h$  – переменная толщина полосы;  $\tau_n$  – напряжения сил трения.

Заметит, что при листовой прокатке допущение напряжения  $\sigma_x$  как постоянство по толщине и приближенное условие текучести плоской деформации будет в виде:

$$\sigma_y - \sigma_x = 2k, \quad (1.16)$$

Для расчета контактного давления при холодной прокатке существует множество различных методов расчета, построенных на основе уравнения Т.Камана. Рассмотрим некоторые методики определения усилия прокатки и контактных давлений:

На основе анализа работ [56, 58-64] установлено, что для расчета контактного давления можно использовать формулу среднего контактного давления:

$$p_{cp} = \gamma \cdot \sigma \cdot n_{cp} \cdot n_b \cdot n_{\sigma} \cdot n_H \quad (1.17)$$

где  $\gamma$ - коэффициент, учитывающий влияние среднего главного нормального напряжения, при листовой прокатке  $\gamma = 1,15$ ;  $n_{cp}$  - коэффициент напряженного состояния;  $n_b$  - коэффициент, учитывающий влияние внешних частей полосы на очаг деформации;  $n_{\sigma}$  - коэффициент, учитывающий влияние внешних зон на очаг деформации;  $n_H$  - коэффициент, учитывающий влияние натяжения или подпора.

Определение коэффициента напряженного состояния  $n_{cp}$ :

В работе [39-42] А.И. Целиков предложил определять среднее давление в зависимости от среднего коэффициента напряженного состояния  $n_{cp}$  без учета влияния внеконтактных зон и внешних частей полосы на очаг деформации:

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot n_{cp}, \quad (1.18)$$

Средний коэффициент напряженного состояния, полученный А.И. Целиковым методом тонких сечений, определяют по формуле [51]:

$$n_{cp} = \frac{2(1-\varepsilon) \cdot h_H}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \left( \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta} - 1 \right), \quad (1.19)$$

где  $\varepsilon$  и  $\Delta h$ - относительное и абсолютное обжатия полосы соответственно;  $\delta = \frac{2\mu l_d}{\Delta h}$  - параметр введенной А. И Целиковым, характеризующий очаг деформации при прокатке;  $\mu$  - коэффициент контактного трения, который определяется экспериментально или по формулам, в том числе А.П Грудева;  $h_H = \sqrt{h_0 \cdot h_1}$  - толщина полосы в нейтральном сечении очага деформации, в первом приближении, мм.

М. Д Стоун при рассмотрении процесса прокатки заменил схему на осадку металла между двумя параллельными плитами и предложил определять средний коэффициент напряженного состояния  $n_{cp}$  по формуле, приведенной в справочнике [44]:

$$n_{cp} = \frac{h_{cp}}{\mu \cdot l_{д}} \left[ e^{\frac{\mu \cdot l_{д}}{h_{cp}}} - 1 \right], \quad (1.20)$$

Заметим, что расчет  $n_{cp}$  по формуле Э. Зибеля [65], полученной при упрощенном решении уравнения Кармана:

$$n_{cp} = 1 + \frac{\mu \cdot l_{д}}{2h_{cp}}, \quad (1.21)$$

Определение коэффициент  $n_{\sigma}$ :

По А. И Целикову и В. С Смирнову [40] при проведении эксперимента для определения  $n_{cp}$ , они получили зависимость коэффициента  $n_{\sigma}$  от величины  $l_{д}/h_{cp}$ ; то есть  $n_{\sigma} = f\left(\frac{l_{д}}{h_{cp}}\right)$ , при  $\frac{l_{д}}{h_{cp}} < 1$  описана уравнением  $n_{\sigma} = \left(\frac{l_{д}}{h_{cp}}\right)^{0,4}$  (рис. 1.16).

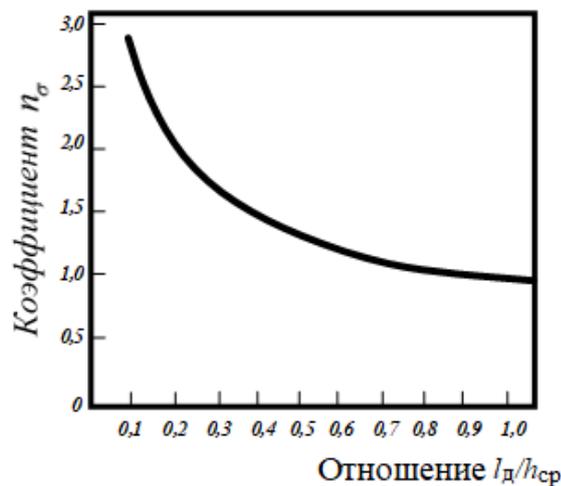


Рисунок 1.16 – Кривая зависимости коэффициента  $n_{\sigma}$  от величины  $l_{д}/h_{cp}$  при

$$l_{д}/h_{cp} < 1.$$

В.М Луговской получено уравнение для определения коэффициента напряженного состояния для короткого очага деформации:

$$n_{\sigma} = 1,25 \ln \chi + \frac{1,25}{\chi} - 0,25, \quad (1.22)$$

где  $\chi = \frac{h_{cp}}{l}$ , если  $1 \leq \frac{h_{cp}}{l} \leq 8,7$ ;  $\chi = \frac{l}{h_{cp}}$ , если  $0,25 \leq \frac{l}{h_{cp}} \leq 1$ ;

В работе [37] представлены кривые контактного давления при прокатке

слитков сортов профиля в зависимости от формы очага деформации  $l_d/h_{cp}$  и показаны на рисунке 1.17.

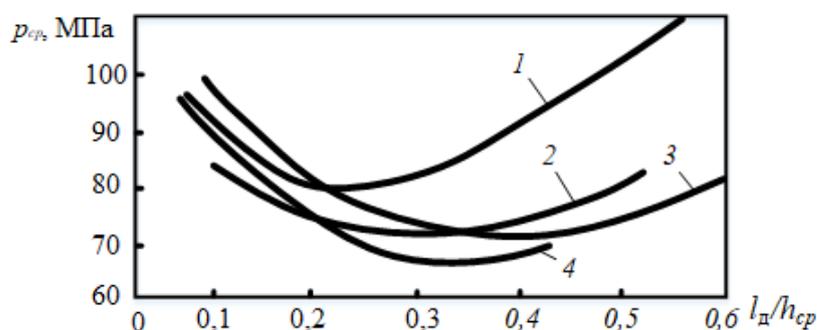


Рисунок 1.17 – Зависимости среднего контактного давления ( $p_{cp}$ ) от формы очага деформации  $l_d/h_{cp}$  при прокатке блюмов из разных сталей и разных сечений: 1- СТ.6, блюмы 160x160 мм и 170x170 мм; 2- СТ.3, блюм 225x310мм; 3- СТ.4, блюм 170x170 мм; 4- СТ.3, блюм 160x160 мм [37].

Определение коэффициента  $n_b$ :

Коэффициент  $n_b$  полученной С.И. Губкиным определяют по формуле:

- При  $b_{cp} > l_d$ :

$$n_b = \left( 1 + \frac{3b_{cp} - l_d}{6b_{cp}} \frac{\mu l_d}{h_{cp}} \right) : \left( 1 + \frac{\mu l_d}{h_{cp}} \right), \quad (1.23)$$

- При  $l_d / h_{cp} < 2$  (можно принять  $\mu = 0,5$ ):

$$n_b = \left( 1 + \frac{3b_{cp} - l_d}{3b_{cp}} \frac{l_d}{h_{cp}} \right) : \left( 1 + \frac{l_d}{4h_{cp}} \right), \quad (1.24)$$

Кроме того, при анализе блок-схемы для расчета силы прокатки при холодной прокатке известных авторов: А. И. Целикова, А. А. Королева, Е. С. Рокотяна, М. Д. Стоуна, А. В. Третьякова, Б. Е. Локшина и других ученых [44] видно, что при расчете по этим методам отклонения расчетных значений сил прокатки от экспериментальных данных, иногда, находятся в диапазоне от -30 до +30%. Особенно много работ, в которых приведены результаты такого сравнения,

опубликовано с 1960 года до времени настоящего.

На основании анализа данных, представленных многими авторами, следует заметить, что даже при прокатке одного раската в различных проходах одного листового стана нельзя безоговорочно отдать предпочтение одной какой-либо методики расчета давления и силы прокатки. Даже для одних и тех же условий прокатки, также результаты полученные разнящиеся существенно.

Причины этой проблемы являются следующими:

- 1) погрешность при определении экспериментальных данных;
- 2) низкая точность методики расчета;
- 3) погрешность расчета, вносимая исследователем за счет того, что зачастую используется не методика расчета усилия прокатки (т.е. весь набор зависимостей, рекомендуемых автором методики), а лишь конечная формула, другие же зависимости для расчета (например, сопротивление деформации, скорость деформации, коэффициент трения и т.п.) принимаются произвольно

Однако построение модели для полной оценки факторов, влияющих на средние контактные давления при прокатке полос, еще не в полной мере, требующее для дальнейших исследований. Таким образом, проектирование режимов прокатки полос и листов предполагает использование адекватных моделей для расчета контактного давления и силы прокатки, в том числе и по длине полосы. Требуется количественная оценка влияния определяющих факторов на давление и силу прокатки. Известно, что определяющее влияние, наряду с площадью контактной поверхности металла с валками, на формирование силы прокатки оказывает контактное давление, зависящее от сопротивления металла деформации, контактного трения и напряженного состояния полосы.

#### **1.4 Сопротивление металла деформации при холодной прокатке**

Конструкторы и технологи, работающие в области обработки металлов давлением, при расчетах широко используют данные, характеризующие механические свойства холоднодеформированного металла: временное

сопротивление  $\sigma_B$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение при разрыве  $\delta$ , твердость (по Бринеллю) HB и (по Виккерсу) HV.

Определение каждой из механических характеристик проводится по методикам, указанным в соответствующих ГОСТах. Для образцов черных и цветных металлов и сплавов проводится в соответствии с ГОСТ 1497 – 84 [66].

В результате испытаний [35-37, 67, 68] получена диаграмма растяжения образцов, характеризующая показателями механических свойств - временным сопротивлением  $\sigma_B$  (в точке 3), условным пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  (остаточная деформация не превышает 0,2%) и относительным удлинением  $\delta$  (рис. 1.18).

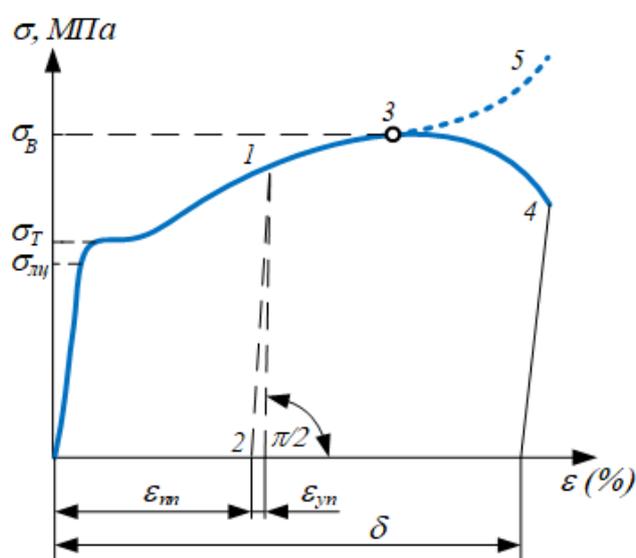


Рисунок 1.18 – Диаграмма растяжения

Основным фактором, влияющим на усилие прокатки, необходимое для уменьшения толщины полосы на прокатном стане, является предел текучести прокатываемого материала. При холодной прокатке алюминия обычно преобладает деформационное упрочнение. С другой стороны, скорость деформации и температура более важны при горячей прокатке. Легирующие элементы и состояние, в котором они находятся внутри материала, влияют на каждый из этих факторов. Поэтому для прогнозирования предела текучести

необходимо хорошее понимание истории обработки подката и конкретного химического состава сплава.

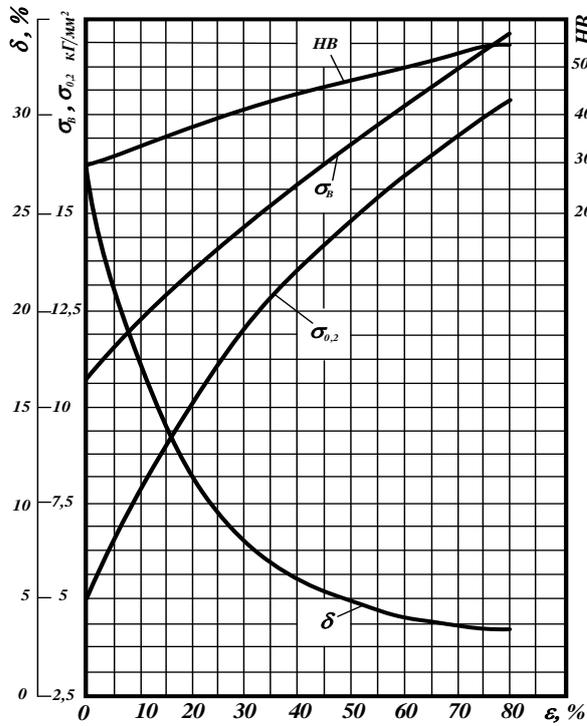
Анализ данных в работах [6, 67, 69-84] показал, что при обработке металлов давлением изменение механических свойств (предела текучести, предела прочности, относительного удлинения и твердость) существенно зависит от степени деформации.

В работе [69] на основе анализа экспериментальных данных получены регрессионных уравнений для расчета предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$ , относительного удлинения  $\delta$  и показатели твердости различных алюминиевых сплавов от относительной деформации  $\varepsilon$ . Эмпирические уравнения, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Эмпирические уравнения о зависимости механических свойств металла (предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$  и показатели твердости) от относительной деформации алюминиевых сплавов

Сплав	Эмпирические уравнения
Алюминий А00	$\sigma_{0,2} = 1,8 + 0,28\varepsilon^{0,74}$ , $\sigma_B = 4,1 + 0,05\varepsilon^{1,08}$
Алюминий А2	$\sigma_{0,2} = 9,5 + 0,94\varepsilon^{0,59}$ , $\lg \delta = 1,415 - 3\varepsilon + 2,7\varepsilon^2$
Алюминиевый сплав АМГ1	$\sigma_{0,2} = 10 + 1,3\varepsilon^{0,59}$ , $\sigma_B = 21 + 0,7\varepsilon^{0,55}$ , $\lg \delta = 1,352 - 1,55\varepsilon + 1,2\varepsilon^2$ , $HB = 49 + 2,1\varepsilon^{0,61}$
Алюминиевый сплав Д1	$\sigma_{0,2} = 8,8 + 3,5\varepsilon^{0,41}$ ; $\sigma_B = 18,8 + 0,56\varepsilon^{0,73}$
Алюминиевый сплав Д16	$\sigma_{0,2} = 45 + 4\varepsilon^{0,31}$ , $\lg \delta = 1,389 - 2,32\varepsilon + 1,1\varepsilon^2$
Алюминиевый сплав АСМ	$\sigma_{0,2} = 4 + 1,6\varepsilon^{0,45}$ , $\sigma_B = 9 + 0,21\varepsilon^{0,84}$ , $\lg \delta = 1,491 - 1,83\varepsilon + 0,7\varepsilon^2$
Алюминиевый сплав АМГ5п	$\sigma_{0,2} = 15 + 4,5\varepsilon^{0,42}$ , $\sigma_B = 32,5 + 0,42\varepsilon^{0,85}$ , $\lg \delta = 1,438 - 2,42\varepsilon + 2\varepsilon^2$

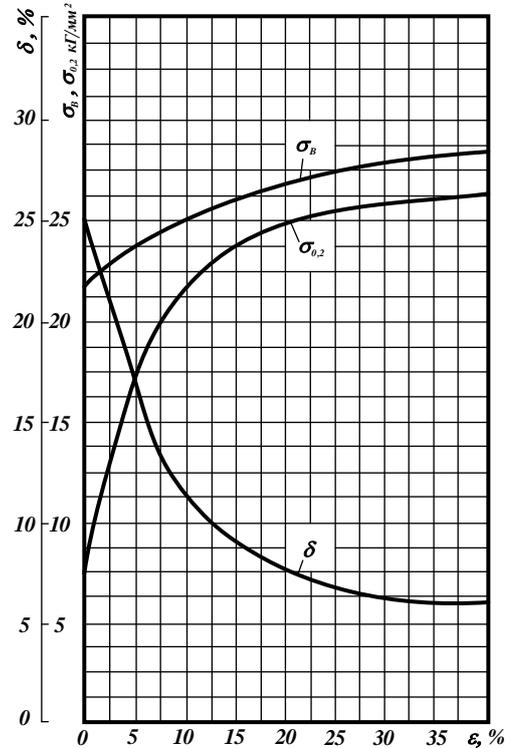
На рисунке 1.19 приведены зависимости предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$ , относительного удлинения  $\delta$  и показатели твердости алюминиевых сплавов АМц и АМгЗ от относительной деформации  $\varepsilon$ .



а – Алюминиевый сплав АМц

$$\sigma_{0,2} = 5 + 0,6\varepsilon^{0,71}; \quad \sigma_B = 11 + 0,03\varepsilon^{1,34}$$

$$\lg \delta = 1,439 - 2,16\varepsilon + 1,3\varepsilon^2; \quad HB = 30 + 0,2\varepsilon^{1,1}$$



б – Алюминиевый сплав АМгЗ

$$\sigma_{0,2} = 7,5 + 6,4\varepsilon^{0,3}; \quad \sigma_B = 22 + 0,66\varepsilon^{0,63}$$

$$\lg \delta = 1,406 - 3,8\varepsilon + 5,8\varepsilon^2$$

Рисунок 1.19 – Зависимости механических свойств алюминиевых сплавов от степени деформации  $\varepsilon\%$  [69]

Однако механические свойства сплава АД33 подробно не исследованы. Таким образом, построение и использование полученных регрессионных уравнений для расчета сопротивления металла деформации и других реологических свойств алюминиевого сплава АД33 найдет применение в системах автоматизированного проектирования (САПР) и определения силовых показателей процессов холодной прокатки полос и лент, является актуальной задачей исследований.

## 1.5 Смазочные материалы для процессов прокатки

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) и смазки, используемые при обработке металлов давлением, должны отвечать различным требованиям. Смазочно-охлаждающие жидкости в области обработки металлов должны быть эффективными, экономичными и не содержать ингредиентов, вредных для здоровья и окружающей среды.

При смазывании двух поверхностей скольжения могут возникать различные режимы смазки в зависимости от скорости скольжения, свойств смазки и нормальной силы между поверхностями. Когда две поверхности разделены значительным слоем смазки, происходит полный пленочный режим. В этом режиме две металлические поверхности не имеют прямого контакта, и вся нагрузка на сдвиг между ними — это сдвиг жидкости из-за вязкости. Если из-за низкой вязкости, скорости или силы контакта две металлические поверхности вступают в прямой контакт, возникает режим смешанной пленки. В этом режиме сила сдвига между поверхностями представляет собой комбинацию трения смазки и металла.

В работе [85] показано, что при высокоскоростной прокатке относительно тонких лент и полос, условия получения качественного прокатка во многом определяются эффективностью используемых технологических смазочных материалов. Вопросы рационального выбора этих смазок и способы их применения рассматриваются в работах [50, 86-90]. Повышение уровня требований к точности лент и снижения нагрузок на оборудование в процессе промышленного производства холоднокатаного листового металла делает актуальным проведение дальнейших исследований, направленных на повышение степени научной обоснованности применения технологических смазок, принимаемых в каждом конкретном случае.

В современных условиях развития процессов холодной листовой прокатки наиболее эффективными технологическими смазками считаются те, которые обладают достаточно широким набором полезных свойств и обеспечивают условия для осуществления процесса холодной прокатки при максимально

возможной степени деформации. с минимальными расходами энергии (электричество, вода, пар). В то же время технологические смазки должны обладать достаточной степенью термостойкости и стабильности смазочных свойств при высоких скоростях прокатки [50, 86-88].

С увеличением скорости процесса холодной прокатки увеличивается степень влияния теплового воздействия, вибрационных нагрузок и гидродинамического воздействия жидкой фазы. Кроме того, степень износа твердой (квазикристаллической) смазочной пленки может изменяться, что в совокупности обуславливает создание особых условий эксплуатации для технологических смазочных материалов. Исходя из вышеизложенного, целесообразно использовать смазки, образующие на поверхности, полосы устойчивую связь.

### **1.5.1 Анализ применения и влияния технологических смазок на показатели холодной прокатки полос**

Смазочные материалы, используемые при обработке металлов давлением, следует понимать, как третью среду, которая полностью или частично отделяет от прямого контакта между деформированной заготовкой и инструментом. По существу, смазочная среда может быть твердой, гибкой, пластично-вязкой, влажной или газообразной, или их комбинацией. В процессе холодной прокатки использование смазочных материалов должно обеспечивать такие технические требования, как качество поверхности заготовки, должно быть чистым, иметь хорошую эффективность смазки, легкую очистку, отсутствие дефицита и экономичность. Кроме того, смазка также должна действовать как защитный агент и предотвращать коррозию металла во время прокатки и последующих операций, не причинять вреда здоровью рабочих и проста в обращении. Во время отжига заготовки не должно оставлять пятен на поверхности.

Смазочные материалы напрямую влияют на технологические параметры процесса прокатки, поэтому в процессе холодной прокатки для обеспечения эффективности смазки следует учитывать физико-химические свойства, скорость прокатки, длину листа и твердость деформируемого материала. Физические и

химические свойства смазочных материалов определяются как вязкость, содержание поверхностно-активного вещества и долговечность смазочной пленки в зоне деформации. Обычно чем выше вязкость смазки и чем выше содержание поверхностно-активного вещества, тем ниже коэффициент трения. В настоящее время разработаны технологические смазки с моющими свойствами для удаления грязи с поверхности полосы, тем самым улучшая качество поверхности полос и валков.

В работе [91] показано, что при использовании большой смазочно-охлаждающей жидкости сила, действующая на валки, снижается на 7% и снижает напряжения на валках на 4%. Известно, что использование смазок с более высокой вязкостью приводит к формированию более толстого слоя смазки, более надежно защищая инструмент. В сочетании с высокими скоростями прокатки это приводит к появлению режима гидродинамической подачи смазки, что снижает энергосиловые параметры деформации. Кроме того, можно ожидать снижения вредного воздействия явления прилипания алюминиевого сплава к валкам, что требует дальнейшие исследования при использовании различных смазок.

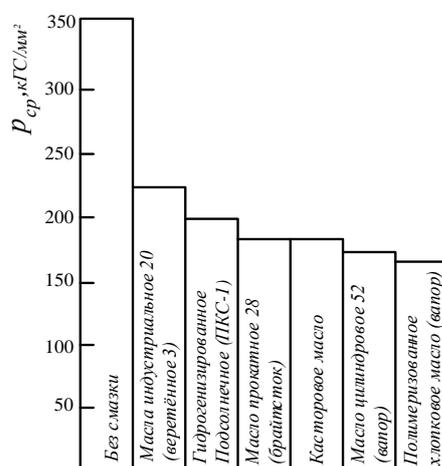


Рисунок 1.20 – Среднее давление при прокатке полос из стали 08кп в сухих валках и с применением минеральных и растительных смазок [92]

В работе [92] видно, что при прокатке ленты с обжатием 10-15% из стали 08кп с применением технологических смазок величины среднего давления позволило снизить в два и более раза по сравнению с прокаткой в сухих валках.

В работах [93-96] были исследованы технологические смазки при прокатке, такие как: Квакерол 671, Минеральное масло И-20, Эмульсол Т-5%, MobiRolling-5%, GreenEngineer- 5%, Эфирол 7/15-5%, Эфирол Вп-5%, АКТО-5% на усилие и мощность при холодной прокатке полос 0,5×820 мм из стали марки 08Ю на непрерывном стане 1700 АО «АрселорМиттал Темиртау». Результаты расчетов показывают, что значения усилия прокатки и допустимой нагрузки минимальны при использовании смазки Квакерол 671 во всех клетях, что объясняется более высокой вязкостью данной смазки (55 мм<sup>2</sup>/с) по сравнению с другими смазками, и, следовательно, наименьшим коэффициентом трения (от 0,26 до 0,28 у Квакерол 671, и, от 0,27 до 0,32 у остальных смазок).

В работе [97] при прокатке лент стали 08кп размером 1x50x1000 мм на двухвалковом стане 100 с использованием эмульсионной смазки (эмульсии 2,5%-ной, 5%-ной, 10%-ной). Результаты, приведенные на рисунке. 1.21, показывают, что влияние различных смазочных материалов на коэффициент трения отличается. В частности, значение коэффициента трения при использовании смазки эмульсии 2,5%-ной наибольший (0,149 до 0,173), а самый низкий при использовании эмульсии 10%-ной (от 0,083 до 0,108).

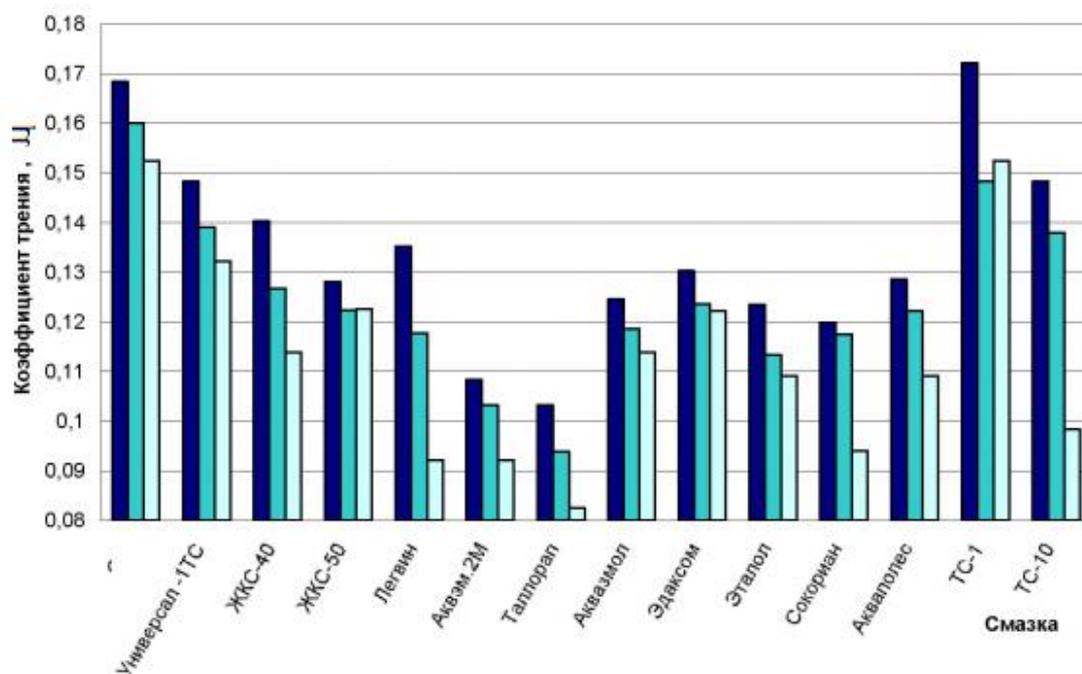


Рисунок 1.21 – Зависимость коэффициента трения от различных водных эмульсий

■ 2,5 %; ■ 5%; ■ 10%-ной концентрации при холодной прокатке тонких полос

В работе [98] при прокатке материалов из меди и медных сплавов на прокатном станке 150x235 с использованием различных смазок исследовано влияние коэффициента трения на обжатие. Результаты экспериментов показывают влияние коэффициента трения на деформационно-силовые показатели. Обнаружено, что при увеличении коэффициента трения обжатие полос уменьшается (рис. 1.23 и 1.24).

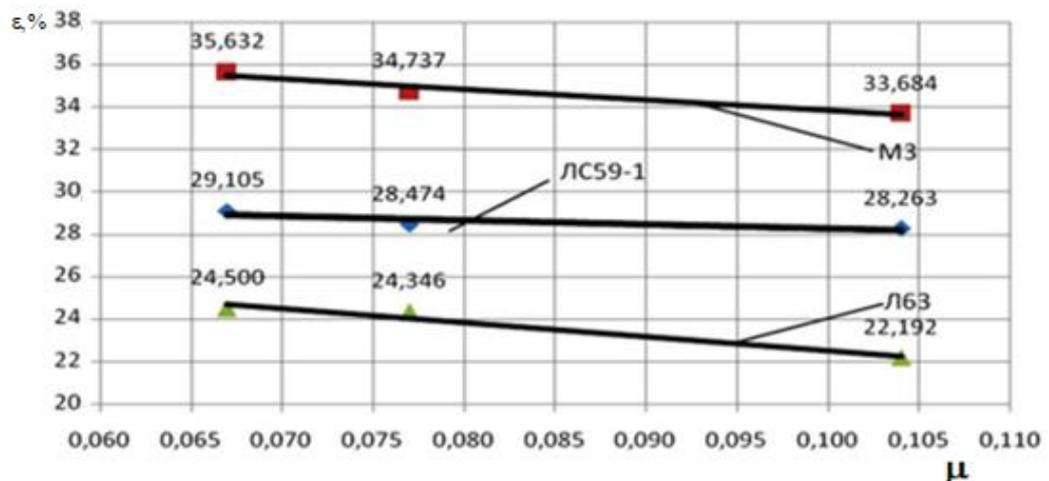


Рисунок 1.22 – Влияние коэффициента контактного трения соответствующих различным смазкам на обжатие на стане 150x235 при деформации листов из меди МЗ и латуни ЛС59-1 и Л63 [98]

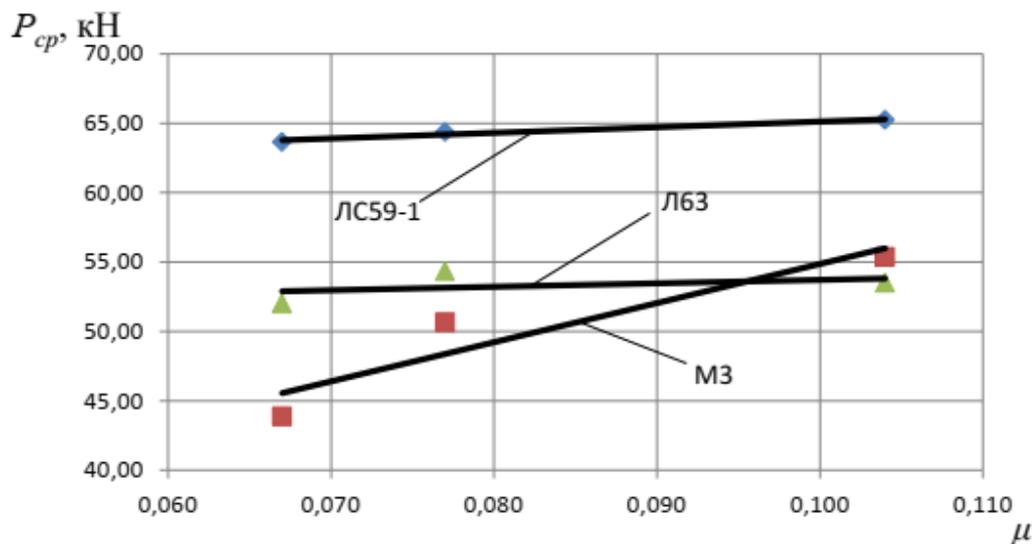


Рисунок 1.23 – Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего опытными смазкам, на средние величины усилий прокатки на стане 150x235 при деформации полос из меди МЗ и латуни Л63, ЛС59-1. [98]

### **1.5.2 Анализ технологических смазок для холодной прокатки алюминиевых полос, листов и лент**

Окисляемость алюминия помогает ему естественным образом противостоять коррозии. При воздействии алюминия с воздухом на поверхности быстро образуется окисленная пленка, защищающая поверхность от коррозии. По сравнению с другими металлами алюминиевый сплав считается мягкий, а высокая пластичность придает алюминиевому сплаву большую гибкость. Было обнаружено, что обычные методы деформирования, такие как экструзия, штамповка и прокатка, подходят для алюминия сложной формы или минимальной толщины.

Среди всех методов профилирования и формовки наиболее широко используется прокатка. Как указал Уилсон в 1997 году, около 70% тоннажа всех металлов прокатывается хотя бы один раз в процессе производства [99]. По рабочей температуре прокатка подразделяется на горячую или холодную. Если рабочая температура процесса прокатки выше температуры рекристаллизации металла, которая составляет примерно 0,5-0,7 от температуры плавления металла, процесс прокатки определяется как горячая прокатка. Соответственно, рабочие условия для холодной прокатки ниже температуры рекристаллизации металла. При горячей прокатке может быть достигнута большая деформация по сравнению с холодной прокаткой, поскольку металл остается мягким и пластичным. Однако чистота поверхности продукта, достигаемая при горячей прокатке, хуже, чем при холодной прокатке из-за окисления, адгезии и потерь материала, усиливающиеся при высокой температуре. Для конечного продукта требуется хороший внешний вид, а для точного контроля размеров, как для металлического листа или фольги, необходима холодная прокатка.

При введении смазки в процесс холодной прокатки на поверхности материала образуется защитный слой, предотвращающий прямой контакт металла с металлом, таким образом, ожидается устранение высокого трения. Другая распространенная проблема при холодной прокатке - повышение температуры. Для некоторых твердых материалов наблюдается повышение температуры

примерно на 80 °С из-за высокой степени пластической деформации и трения. Высокая температура на границе контакта вызывает размягчение материала и может возникнуть дальнейшая адгезия. Поток смазки при холодной прокатке отводит тепло и действует как охлаждающая жидкость, снижая температуру.

Обычно используемые смазочные материалы при холодной прокатке — это минеральное масло или синтетическая смазка. На основании структурных различий минеральные масла обычно делятся на ароматические, нафтеновые и парафиновые. Было обнаружено, что парафиновые смазки содержат длинноцепочечные углеводороды прямой или разветвленной формы, которые теоретически лучше всего подходят для защиты поверхности. Для улучшения характеристик смазочного материала или улучшения определенных свойств используются различные присадки;

Благодаря выдающимся свойствам алюминиевого сплава он является одним из наиболее широко используемых материалов во многих промышленных областях. Спрос на высококачественную алюминиевую продукцию за последние несколько десятилетий резко вырос и будет продолжать расти. Холодная прокатка как основной метод обработки алюминиевого сплава напрямую влияет на качество поверхности и свойства продукта. С целью улучшения качества поверхности продукта смазочные материалы широко используются в производстве формовки алюминия.

Ожидается, что с применением смазочных материалов трение между валком и прокатным листом уменьшится, а повышение температуры в процессе прокатки теоретически должно быть ограничено. Однако на эффективность смазки влияет множество факторов, таких как скорость прокатки, степень обжатия и вязкость смазки.

В работе [50] указано, что при холодной прокатке алюминия и его сплавов применяют водные эмульсии и маловязкие минеральные масла с присадками (раздельно или совместно). В СССР и РФ большое распространение получила 8—10%-ная эмульсия из эмульсола 59ц. В качестве дополнительной смазки часто используется смесь масла И-12А (25 - 50 %) и осветительного керосина (50 - 75

%) с добавкой олеиновой кислоты (0,5 - 5,0%) [100]. Преимуществом совместного применения водных эмульсий с технологической смазкой является высокая охлаждающая способность, недостатком — повышенная загрязненность поверхности листов.

Для получения качественной поверхности листов применяют маловязкие минеральные масла с присадками. Базовое масло должно иметь температуру вспышки не менее 70—80 °С для обеспечения безопасности работы на стане, температуру конца кипения фракции не выше 300—350 °С во избежание образования пригаров при отжиге, узкий интервал вскипания фракций для обеспечения высокой температуры вспышки при минимальной температуре конца кипения. Минимальное содержание ароматических и нафтеновых соединений, кислотное число не более 0,25—0,45.

При холодной прокатке алюминия и его сплавов технологические смазки делятся на следующие группы:

- \* Растительные масла, применяемые в чистом виде или в виде механических смесей с водой (водных дисперсий).

- \* Минеральные масла, применяемые в чистом виде или с добавкой растительных либо животных жиров.

- \* Сложные эфиры синтетических жирных кислот.

- \* Водные эмульсии минеральных или растительных масел и животных жиров.

Растительные масла, такие как: пальмовое, арахисовое, рисовое, касторовое, оливковое и др. являются эффективными смазочными материалами, а также эмульсии на их основе, сложные эфиры жирных кислот и некоторые минеральные масла, обладающие высокой вязкостью. Однако многие растительные масла дороги и дефицитны, поэтому их использование ограничено. Самая распространенная — это эмульсии, применяемые при холодной прокатке, которые являются одновременно смазывающими и охлаждающими жидкостями.

Поэтому изучение влияния применения различных технологических смазок на деформационно-силовые показатели процесса и формирование размеров при

прокатке алюминиевых полос и лент, актуально при сравнении чаще всего применяемых на производстве: Индустриальное масло №40; Подсолнечное масло; Пальмовое масло; керосин и СПЗ.

## **1.6 Современные компьютеризированные программные системы моделирования процессов прокатки**

Компьютерное моделирование представляет собой комбинацию математического моделирования технологического процесса или оборудования и численных методов расчета показателей этого процесса. Численное моделирование конкретных технологических условий деформирования позволяет исследовать не контролируемые переменные с целью совершенствования и оптимизации технологического процесса прокатки. Моделирование процесса — это основная часть, которая играет важную роль в численном моделировании. Численные методы, применяемые модели, являются инструментами для этого. Точность результатов численного моделирования определяется точностью модели и адекватностью алгоритма расчета.

С помощью моделирования можно усовершенствовать существующие процессы прокатки, разработать и внедрить новые передовые технологии, без которых невозможно представить современное производство. В настоящее время доступен ряд программных продуктов для исследования и проектирования процессов ОМД, отличающихся универсальностью, широкой применяемостью и точностью вычислений.

Преимущества применения компьютерного моделирования:

- значительное сокращение материалов и времени для разработки и внедрения нового проката за счет исключения дорогостоящих экспериментов с металлами;
- компьютерное моделирование дает точные результаты с допустимыми ошибками, прогнозирует возможные сбои, тем самым принимая обоснованные технологические решения для повышения качества продукции, оптимизируя детальный процесс формообразования.

- ускоренный рабочий процесс приводит к повышению эффективности процесса проектирования, удобству в сохранении и расширении технических знаний в компьютерной среде.

В современном мире существует множество программ численного моделирования для промышленности обработки давлением в целом и листовой прокатки в частности. Это программное обеспечение часто интегрирует множество функций, таких как построение систем автоматизированного проектирования (САПР), метод конечных элементов (МКЭ) и инструменты решения (Решатель) в сочетании с модулем анализа результатов.

Моделируемая заготовка рассматривается как нелинейное вязко пластичное тело, или как линейное или нелинейное упругое твердое тело. Деформация инструмента часто рассматривается как линейная упругая среда. При вводе данных в препроцессор СКМ (Системы компьютерной математики), кроме геометрии и материалов заготовки и инструмента, существуют начальные и граничные условия для температуры, кинематики, силовых характеристик деформации, контактного трения, механических и тепловых свойств материалов, точности расчета, типа расчетных параметров и характеристик процесса прокатки.

В настоящее время существует ряд популярных программных средств, используемых для моделирования проблем обработки давлением в целом и листовой прокатки в частности. Отвечают вышеуказанным требованиям программные продукты: Abaqus, Qform, Derform, Ansys и другие. В таблице 1.2 приведен список специализированного программного обеспечения для обработки давлением.

Таблица 1.2 – Список некоторых программ для цифрового моделирования

№№	Программное средство	Компания, страна	Область применения
1	Q-Form	QuantorSoft, Россия	Деформация ленты, плиты, профиля

№№	Программное средство	Компания, страна	Область применения
2	Deform-3D	BATELLE, США-Германия	Деформация ленты, плиты
3	ABAQUS	HKS, США	Деформация
4	Nastran	MSC, США	Деформация
5	MARC	MARC, США	Деформация блока, плиты
6	EPDAN	IFUSTGT, Германия	Деформация блока, плиты
7	INDEED	INFRO, Германия	Деформация плиты
8	ROBUST	PROF, NAKAMACHI Япония	Деформация плиты
9	ANSYS/LS-DYNA 3D	LSTC, США	Деформация
10	DYNA 3D	LSTC, США	Деформация
11	PAM-STAMP	ESI, Германия-Франция	Деформация

Промышленный лентопрокатный стан 175x300 во Вьетнаме не оснащен системами контроля силовых показателей прокатки. Компьютерное моделирование позволит исследовать влияние условий контактного трения на распределение силы, момента и мощности при прокатке лент из сплава АД33 и оценить нагрузки на оборудование.

### **Выводы по главе 1 и задачи исследования**

На основании анализа опубликованных работ можно сделать следующие выводы:

1. Процесс холодной прокатки полос и лент из цветных металлов и сплавов связан с пластической деформацией, сил прокатки и существенной ролью контактного трения на качество прокатки и силовые показатели. При прокатке различных сплавов происходит неодинаковое изменение составляющих напряжений и деформаций по длине полосы, что требует дальнейшие исследования.

2. Изучена природа внешнего трения, действующего на процесс холодной прокатки, а также основные факторы, которые изменяют значение коэффициента трения при деформации металла. Это позволило обоснованно выбрать метод расчета коэффициента трения по А. П. Грудеву при холодной прокатке полос, в котором учитываются основные входные переменные.

3. На основе анализа блок-схем при вычислении силы прокатки  $P$ , можно рассматривать силу  $P$  как функцию с независимыми переменными. Выявлены основные 3-группы переменных: 1 - группа геометрии валков и полосы ( $R, h_0, h_1, b$ ); 2 - группа свойств, характеризующая условия контактного трения и сопротивления пластической деформации ( $\mu, \sigma_s$  - определяется экспериментально); 3-я группа внешних напряжений (натяжений) до и после деформации ( $\sigma_0, \sigma_1$ ), которые специально создаются и регулируются для обеспечения стабильного и эффективного режима прокатки. Однако условия контактного трения на концевых участках лент не учитываются.

4. В процессе холодной прокатки полос и лент механические свойства металлов изменяются при изменении их деформационных показателей. Определение изменения механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава позволяет повысить точность расчета силовых параметров процесса листовой холодной прокатки. Установление взаимосвязей между основными механическими свойствами и показателями твердости при прокатке, обеспечивают возможность определять сопротивление металла деформации (предел текучести) по твердости. Наличие адекватных уравнений для расчета изменения показателей механических свойства по обжатию позволяет с использованиями автоматизированных систем проектировать рациональные технологические режимы прокатки полос из алюминиевых сплавов на промышленных станах.

5. Проанализированы методы расчета давления и сил при холодной прокатке известных ученых: А. И. Целикова, А. А. Королева, Е. С. Рокотяна, М. Д. Стоуна, А. В. Третьякова и других ученых. Анализ показал, что при расчете по этим методам отклонения расчетных значений сил прокатки от

экспериментальных данных, иногда, превышают 50%. Поэтому метод расчета давления при прокатке тонких полос и лент требует усовершенствования.

6. В большинстве опубликованных работ подробно исследовано влияние условий контактного трения на интегральные силовые показатели при горячей и холодной прокатке полос, которые используются в методах расчета и проектирования технологий и систем автоматизации. Однако, изменение коэффициента и сил трения, в частности за счет изменения смазочных материалов влияет на силу прокатки и формирование толщины по длине полос, что практически не исследовано. Существует потребность в выявлении технологической смазки, обеспечивающей рациональное изменение силовых и деформационных показателей прокатки, а также толщины по длине полосы с учетом марки и химического состава сплава. Влияние различных смазочных материалов валков на деформационно-силовые показатели по длине полос из алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке изучены недостаточно.

7. Энергоемкость является одной из основных характеристик эффективности технологических процессов, т.к. энергетические затраты составляют ощутимую статью общих затрат на производство листового проката. Актуальным вопросом является создание условий деформирования, обеспечивающих снижение энергосиловых параметров прокатки.

Задачи исследования сформулированы во Введении.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД33 КОНКРЕТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Деформируемые алюминиевые сплавы - одни из наиболее часто используемых материалов в повседневной жизни человека и машиностроении благодаря их замечательным свойствам. Во-первых, это легкий сплав, который весит всего 1/3 от массы железа или стали. Одновременно с небольшим удельным весом алюминиевые сплавы имеют достаточно высокую конструкционную прочность. Поэтому листовые заготовки из алюминия широко используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Имеется положительный опыт изготовления элементов кузова полувагона из алюминиевых сплавов, потому что у них есть близкие показатели прочности основного металла и сварного соединения [6].

Первый коммерческий алюминиево-магниевый-кремниевый сплав (51S) был разработан и выведен на рынок в 1921 году [101]. Введение сплава 61S (6061) в 1935 году восполняет потребность в изделиях средней прочности, поддающихся термической обработке, с хорошей коррозионной стойкостью, которые могут быть сварены или анодированные. Сплав (62S) 6062 вариант с низким содержанием хрома и аналогичным содержанием магния и кремния, был введен в 1947 году для обеспечения более мелкого размера зерна в некоторых изделиях холодной обработки. В отличие от более твердых сплавов алюминий-медь, 61S и 62S могут быть легко изготовлены методом экструзии, прокатки иликовки. Механические свойства этих сплавов были адекватными (средний диапазон 40-45 кси) даже при менее чем оптимальной закалке, что позволило им заменить мягкую сталь на многих рынках. Основной состав представлял собой тройной сплав алюминий-магний-кремний с небольшим количеством меди для упрочнения и хрома для контроля перекристаллизации [9].

Сплав 6061 развивался после его первоначального развития, пока в 1963 году пределы сплава не были расширены, чтобы обеспечить его комбинацию со

сплавом 6062. В Европе сплав 6082 используется чаще, чем сплав 6061. Механические свойства аналогичны, но для контроля перекристаллизации используется марганец, а не хром [3].

Коррозионная стойкость сплава 6061 даже после сварки сделала его популярным в ранних железнодорожных и морских применениях, и он по-прежнему используется для различных изделий. Простота при горячей обработке и низкая чувствительность к закалке являются преимуществами кованных автомобильных и грузовых колес. Также из сплава 6061 изготавливаются конструкционный лист и инструментальная плита, выпускаемые для рынка плоского проката, экстрадированные конструкционные профили, трубы и приводные валы для автомобилей [9]. На ряде машиностроительных заводах и в Донгнай (Вьетнам) при изготовлении алюминиевых заготовок для листовой штамповки используется технология холодной прокатки полос.

Изменение механических свойств большинства алюминиевых сплавов при горячей и холодной деформации изучено и приведено в работах [67, 71-78, 103, 104]. Однако в большинстве источников не приведены кривые изменения предела текучести сплавов от степени деформации. Механические свойства алюминиевого сплава АД33 изучены недостаточно. Не приведены кривые и уравнения для определения механических свойств этого сплава с конкретным химическим составом при прокатке тонких полос и лент. Определение механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава позволит повысить точность расчета деформационных и силовых параметров процесса листовой холодной прокатки. Наличие уравнений изменения показателей механических свойства от обжатия позволяют в автоматизированном режиме проектировать рациональные технологические режимы прокатки алюминиевых лент на промышленных станах.

## **2.1 Определение химического состава образцов из алюминиевого сплава АД33**

Во Вьетнам полосовые заготовки из алюминия и их сплавов часто

импортируются из Японии, Малайзии или Южной Корей. Исследования химического состава для повышения точности и надежности расчета показателей прокатки, и также применения результатов этих исследований в производственную практику является актуальностью задачей. Материалом исследования послужили холоднокатаные полосы из алюминиевого сплава размером 3x25x190 мм (рис. 2.1, а), полученные с машиностроительного завода в г. Донг Най (Вьетнам).

С целью повышения надежности и оценки влияния различных факторов на процесс прокатки полос, проводили определение конкретного химического состава опытных полос из сплава АД33. Химический состав опытных полос из алюминиевого сплава (см. рис. 2.1, а) определялся в центре строительных испытаний «АРХИБЛД» оптико-эмиссионным спектральным методом с использованием аналитического прибора PMI-MASTER (см. рис. 2.1, б).



Рисунок 2.1 – Образец и установка для определения химического состава сплава:  
а – Заготовки (полосы) из алюминиевого сплава; б – Аналитический прибор PMI-MASTER

Проведение термообработки заготовок алюминия для получения состояния, являющегося наиболее благоприятным для пластической деформации [105]. Отжиг полос алюминиевого сплава проводили в лаборатории кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» (ОМДиАТ) Московского политехнического университета. Под отжигом алюминия и алюминиевых сплавов обычно понимают полный отжиг: выдержка при

температуре около 410°C в течении 1 часа, после чего проводили медленное охлаждение металла в печи со скоростью около 28°C/час до температуры 260°C с охлаждением на воздухе до температуры около 20°C (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Режим отжига опытных полос из алюминиевого сплава [105]

Результат химического состава полос алюминиевого сплава приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1-Химический состав опытных полос из алюминиевого сплава АД33 [106, 107]

Массовая доля элементов, %										
Al >97,8016	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Be
		0,4754	0,2979	0,2099	0,0945	0,9585	0,1	0,008	0,018	0,017
Al >97,8016	Bi	Ca	Cd	Co	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr
	0,002	0,0017	<0,0003	0,0018	<0,0006	<0,001	<0,0009	<0,0002	0,01	0,0006

Сравнительным анализом установили, что химический состав алюминиевого сплава, соответствует марки АД33 Российскому стандарту ГОСТ 4784–2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки» [102]. Содержание элементов по стандарту, %: Al- Основа; 0,4–0,8Si; ≤0,7Fe; 0,15–0,4Cu; ≤0,15Mn; 0,8–1,2Mg; 0,15–0,35Cr; 0,25Zn; ≤0,15Ti.

## 2.2 Исследование кривых напряжений при растяжении и механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава

Опытные прокатки полос провели на лабораторном двухвалковом стане

150x235 с фактическим диаметром валков 141,6 мм, установленном в лаборатории кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» (ОМДиАТ) Московского политехнического университета (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Двухвалковый прокатный стан 150x235 с установленной микроконтроллерной системой измерения сил прокатки в лаборатории кафедры «ОМДиАТ»

Лабораторный стан оснащен микроконтроллерной системой измерения сил прокатки с точностью  $\pm 0,01$  кН [108] под левым и правым нажимными винтами с частотой 0,1...0,0125 с по длине полосы. Система позволяет вычислять суммарное значение силы, отображать его на циферблатах приборов, передавать собранную информацию на вход компьютера, а также формировать отчет о последовательности прокаток и распечатывать результаты измерений. Система контроля сил прокатки, разработанная совместно с ЗАО ИТЦ «КРОС» (Россия), настроена перед проведением опытных прокаток на опрос датчиков сил с частотой 0,0125 с, соответствующей длине участка полосы, равной 3,113 мм [64]. Прокатка полос из алюминиевого сплава АД33 (см. рис. 2.1, а) с обжатием 10, 20 и 30% была проведена на лабораторном двухвалковом стане 150x235.

Были исследованы основные показатели механических свойств

алюминиевых полос до и после прокатки на двухвалковом стане 150x235. Перед проведением испытаний на растяжение из плоских заготовок вырезали образцы методом электроэрозии на электроискровом отрезном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) CHMER GX360L (рис. 2.4) общей длиной 74 и расчетной 15 мм (рис. 2.5). Испытания образцов на растяжение проводили по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [66] на испытательной машине Zwick/Roell Z250 (рис. 2.6, а) со скоростью 5 мм/мин при температуре окружающего воздуха 23<sup>0</sup>С (рис. 2.6, б) [109, 110].



Рисунок 2.4 – Электроискровая отрезная стана ЧПУ CHMER GX360L

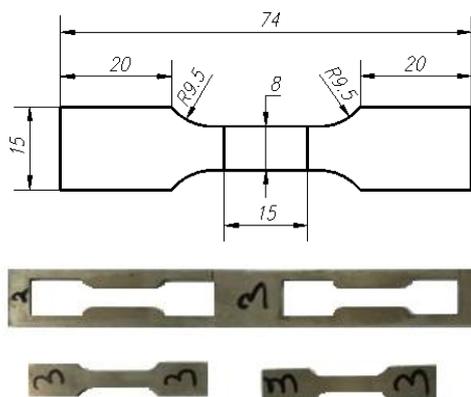
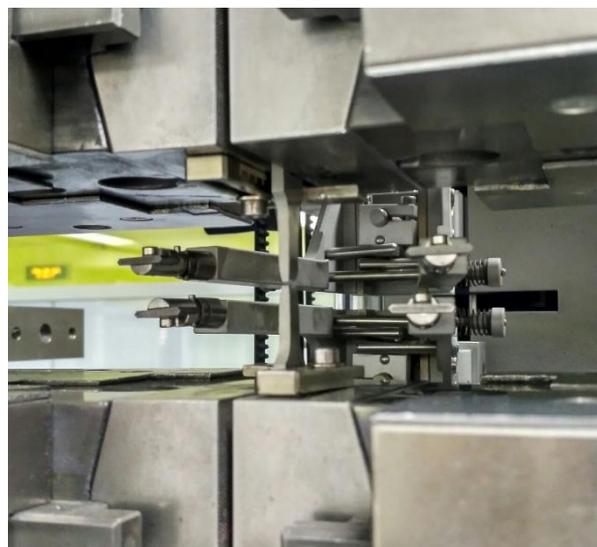


Рисунок 2.5 – Раскрой образцов для испытаний на растяжение



а)



б)

Рисунок 2.6 – Оборудование и испытаний на растяжение

а – испытательная машина Zwick/Roell Z250; б – Испытания образцов на растяжение для определения механических свойств сплава АД33 на машине Zwick/Roell Z250.

## 2.2.1 Исследование механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава

При холодной прокатке металлов и сплавов величина сопротивления металла деформации  $\sigma_s$  (истинный предел текучести  $\sigma_T$ ) зависит от величины суммарного относительного обжатия полосы от отожженного (начального) до рассматриваемого состояния и условий деформирования металла. Большой объем экспериментальных исследований упрочнения (наклепа) различных металлов показывает, что величину  $\sigma_s$  при холодной прокатке определяют зависимостью [43, 69, 71]:

$$\sigma_s = A + B \cdot \varepsilon^D, \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100, \%$  - величина относительной деформации при прокатке;

A, B, D – коэффициенты, которые определяют экспериментально.

Можно отметить, что коэффициент A в уравнении (2.1) численно равен величине сопротивления металла деформации в исходном (отожженном) состоянии.

В ходе проведения испытаний получены диаграммы растяжения образцов, которые характеризуют показатели механических свойств (рис. 2.7)

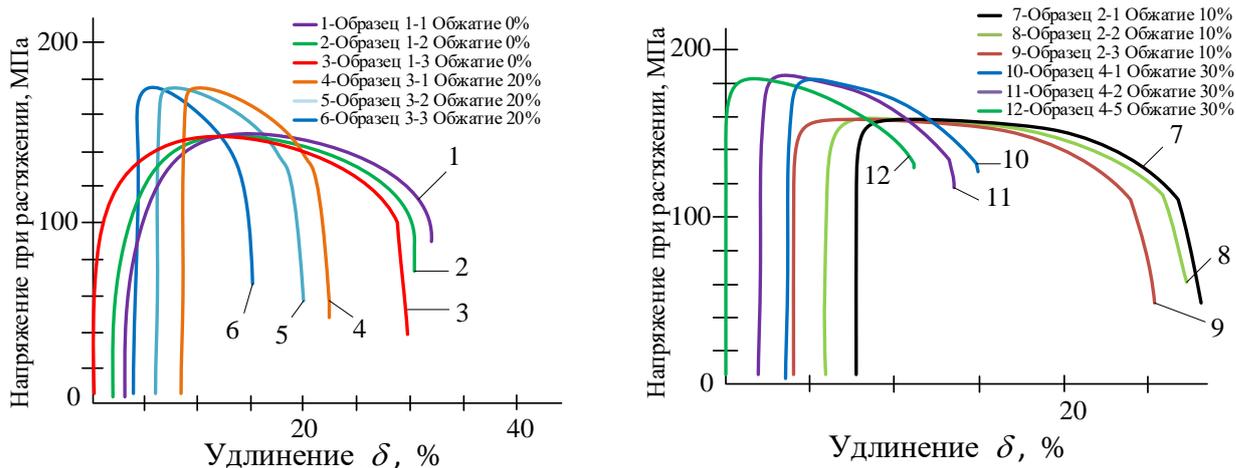


Рисунок 2.7 – Диаграммы напряжений при растяжении образцов из алюминиевого сплава АД33: 1, 2, 3- отожженные образцы; 4, 5, 6 - прокатанные полос с обжатием  $\varepsilon \approx 20\%$ ; 7, 8, 9 -  $\varepsilon \approx 10\%$ ; 10, 11, 12 -  $\varepsilon \approx 30\%$ ; [111].

Усредненные результаты прокатки полос и испытаний образцов на растяжение приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Деформационные показатели холодной прокатки и механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33

№ п/п	Материал полос	Исходная толщина $h_0$ , мм	Толщина после прокатки $h_1$ , мм	Обжатие $\varepsilon$ , %	$\sigma_{0,2} (\sigma_s)$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\lg \delta$
1	АД33	3,02	-	0	70,0	146	28,3	1,452
2		3,02	-	0	70,5	146	29,35	1,468
3		3,02	-	0	71,0	146	30,40	1,483
4		3,02	2,74	9,27	146,0	158	21,40	1,330
5		3,01	2,73	9,30	147,0	158	21,25	1,327
6		3,03	2,72	10,23	148,0	158	21,10	1,324
7		3,02	2,36	21,85	170,0	175	14,10	1,149
8		3,05	2,35	22,95	170,0	175	12,70	1,104
9		3,04	2,33	23,36	170,0	175	11,30	1,053
10		3,03	2,15	29,04	173,0	182	11,40	1,057
11		3,03	2,13	29,70	173,5	183	11,20	1,049
12		3,06	2,09	31,70	174,0	184	11,00	1,041

Результаты испытаний на растяжение образцов прокатанных полос на стане 150x235 позволяют построить графики и регрессионные зависимости сопротивления металла деформации (предел текучести)  $\sigma_s$ , временного сопротивления деформации  $\sigma_b$  и относительного удлинения  $\delta$  от степени деформации  $\varepsilon$ .

Уравнения для определения величины сопротивления металла деформации  $\sigma_s$  в зависимости от обжатия  $\varepsilon$ , предполагают поиск значений коэффициентов (A, B, D) в уравнении (2.1). Разработан метод решения этой задачи, при котором следует составить и решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_{s_0} = A \\ \sigma_{s_1} = A + B \cdot \varepsilon_1^D \\ \sigma_{s_2} = A + B \cdot \varepsilon_2^D \\ \sigma_{s_3} = A + B \cdot \varepsilon_3^D \end{cases}, \quad (2.2)$$

Начальные коэффициенты ( $A = \sigma_{s_0}$ ) исключают из расчетов, они играют лишь косвенную роль. При подобных построениях необходимым условием является значительная (5–10%) разница между величинами степени деформации исследуемых образцов. При малых различиях в обжатиях и узком диапазоне существенно возрастает погрешность в определении коэффициентов и получаемых уравнений.

На основе решения системы уравнений (2.2) с использованием результатов экспериментов, приведенных в таблице 2.2, получены коэффициенты и уравнение для расчета величин сопротивления деформации  $\sigma_s$ , предела прочности  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  в зависимости от обжатия  $\varepsilon$  при холодной прокатке полос из алюминиевого сплава АД33. Аппроксимирующее уравнение между сопротивлением деформации и относительным обжатием имеет вид:

$$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = 70,5 + 43,21\varepsilon^{0,256}; \quad R^2 = 0,98 \quad (2.3)$$

где  $R^2$ - Коэффициент корреляции

Аналогичный подход использовали при построении уравнения для расчета величины временного сопротивления (предела прочности)  $\sigma_B$  от относительной деформации:

$$\sigma_B = 146 + 1,38\varepsilon^{0,97}; \quad R^2 = 0,96 \quad (2.4)$$

Уравнение для определения относительного удлинения:

$$\delta = 0,0148\varepsilon^2 - 1,073\varepsilon + 29,742 ; \quad R^2 = 0,99 \quad (2.5)$$

На основании результатов испытаний образцов на растяжение и полученных регрессионных уравнений построены графики зависимостей сопротивления деформации  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_s$ ), временного сопротивления  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  сплава АД33 от обжатия при прокатке (рис. 2.8).

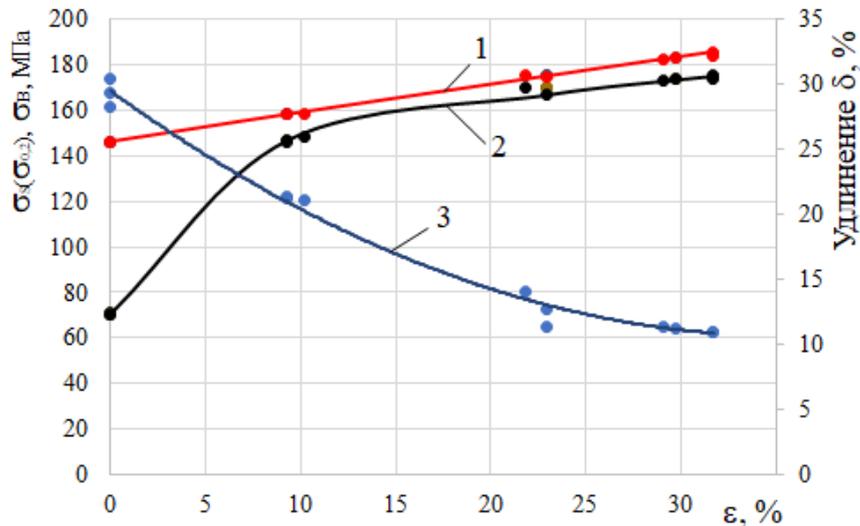


Рисунок 2.8 – Зависимость временного сопротивления  $\sigma_B$  (1), сопротивления деформации  $\sigma_s$  (2) и относительного удлинения  $\delta$  (3) от относительной обжатия  $\varepsilon$  алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке

Графики на рисунке 2.8 показывают, что в пределах исследованной области деформирование  $\sigma_B$  монотонно увеличивается (практически по линейному закону) с 146 до 183 МПа. При обжатии 0÷15%  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_s$ ) интенсивно возрастает с 70 до 160 МПа, а затем медленно увеличивается до 173,5 МПа при  $\varepsilon = 30\%$ . Показатель пластичности  $\delta$  уменьшается с 29,35 до 11,2% по параболе второй степени [109-111].

Использование полученных регрессионных уравнений для расчета сопротивления металла деформации и других реологических свойств алюминиевого сплава АД33 найдет применение в системах автоматизированного проектирования (САПР) и для определения силовых показателей процессов холодной прокатки полос и лент.

### 2.2.2 Определение основных механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 по различным показателям твердости при холодной прокатке

Определение твердости материалов как метод оценки их механических свойств широко используется в технике. Показатель твердости часто используется для оценки некоторых других свойств материалов, таких как прочность на растяжение, сопротивление истиранию, обрабатываемость резанием. Поэтому определение взаимосвязей твердости с деформацией, механическими свойствами материалов с определенным химическим составом алюминиевого сплава позволяет получать более достоверные данные о механических свойствах прокатных изделий. Использование результатов измерения твердости для определения основных показателей механических свойств алюминиевого проката при расчетах и проектировании режимов прокатки обеспечит точность определения нагрузок на оборудование на металлургических и машиностроительных заводах в том числе в г.Донг Най (Вьетнам). И что актуально, без проведения испытаний образцов на разрыв.

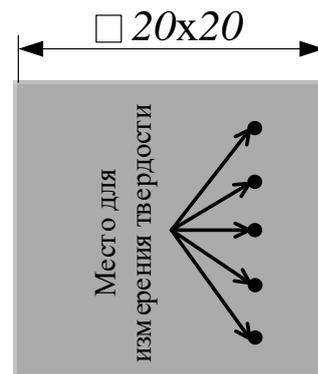
Определению механических свойств материалов по твердости посвящено несколько работ [72, 112-114]. Изменение механических свойств большинства алюминиевых сплавов при горячей и холодной деформации изучено и описано в работах [69, 71]. Влияние степени деформации на твердость различных сплавов, кроме АД33 изучено и приведено в работах [69, 79-84]. Однако в указанных источниках не приведены кривые изменения твердости сплавов от степени деформации и зависимости сопротивления деформации  $\sigma_s(\sigma_{0,2})$ , временного сопротивления  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  от твердости при прокатке полос из алюминиевого сплава АД33 конкретного химического состава.

Измерение твердости по Виккерсу (HV) испытуемого материала производили с помощью твердомера МЕТКОН DUROLINE МН-6 в пяти точках по площади образца согласно ГОСТ 2999–75 [115] в лаборатории НИТУ “МИСиС” (рис. 2.9). Этот метод подходит для измерения твердости мелких деталей и тонколистовых материалов.

Как известно, определение твердости по Виккерсу не зависит от размера испытательной головки. Измерения твердости проводили с помощью четырехстороннего пирамидального алмазного наконечника стандартного размера с углом между противоположными плоскостями  $136^\circ (\pm 3^\circ)$  (рис. 2.10). Испытательный наконечник прижимали к материалу под действием нагрузок 1000 граммов и за время 10 сек. После снятия груза измерили диагональ  $d$  углубления. Значение, которого представляется на экране цифрового дисплея прибора.



а)



б)



с)

Рисунок 2.9 – Измерение твердости по Виккерсу [116]

а – оборудование для измерения твердости; б – размер образца; с – образцы.

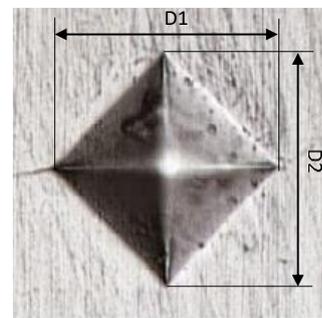
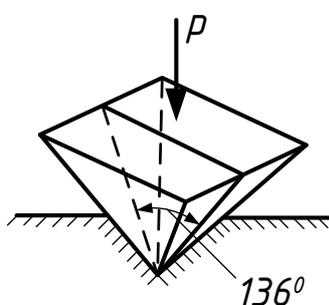


Рисунок 2.10 – Вогнутая поверхность образуется при приложении силы к испытательному образцу с помощью алмазного пирамидального пуансона.

Результаты исследований твердости А.В. Третьяковым, М.П. Марковцем и другими учеными показали, что величина твердости материала при холодной прокатке определяется зависимостью [69]:

$$H = A_1 + B_1 \cdot \varepsilon^{D_1}, \quad (2.6)$$

где  $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100, \%$  - величина относительной деформации при прокатке;  $A_1, B_1,$

$D_1$  – коэффициенты, которые определяют экспериментально;  $H$  - величина твердости испытываемого материала.

Заметим, что коэффициент  $A_1$  в уравнении (2.6) численно равен величине твердости металла деформации в исходном (отожженном) состоянии.

На основе анализа таблиц из стандарта [117] получили отношение между твердостью алюминиевых изделий по Виккерсу (HV) и по Бринеллю (HB) (рис. 2.11).

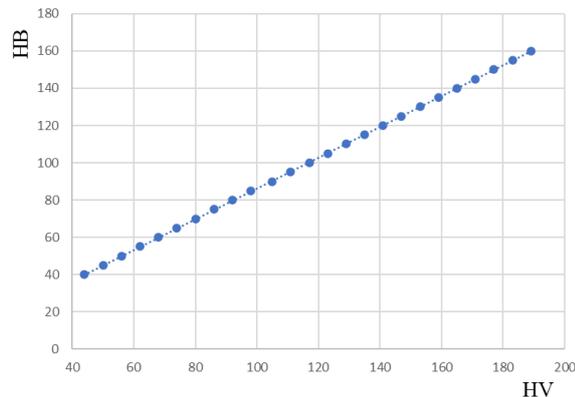


Рисунок 2.11 – Отношение между твердостью алюминиевых изделий по Виккерсу (HV) и по Бринеллю (HB)

Уравнение преобразования показателя твердости алюминиевых изделий по Виккерсу в твердость по Бринеллю:

$$HB = 0,8254 \cdot HV + 3,7621, \quad R^2 = 0,99 \quad (2.7)$$

Результаты измерения твердости по Виккерсу прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 и расчет по уравнению (2.7) твердости по Бринеллю представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Твердость полос из алюминиевого сплава АД33 после прокатки с различными обжатиями

Место	До прокатки		$\varepsilon \approx 10\%$		$\varepsilon \approx 20\%$		$\varepsilon \approx 30\%$	
	HV, МПа	HB, МПа	HV, МПа	HB, МПа	HV, МПа	HB, МПа	HV, МПа	HB, МПа
1	49,2	44,4	52,7	47,3	57,9	51,6	61,0	54,1
2	46,7	42,3	55,2	49,3	56,2	50,1	61,9	54,9
3	49,3	44,5	56,1	50,1	57,2	51,0	60,2	53,5
4	51,0	45,9	55,4	49,5	58,3	51,9	63,4	56,1
5	48,6	43,9	53,2	47,7	56,1	50,1	62,0	54,9
Среднее	49,0	44,2	54,5	48,8	57,14	50,9	61,7	54,7

Результаты определения твердости образцов от прокатанных полос на стане 150x235 позволяют построить графики и регрессионные зависимости твердости от степени деформации  $\varepsilon$ .

Построение уравнения для определения величины твердости  $H$  в зависимости от обжатия  $\varepsilon$ , предполагает поиск значений коэффициентов ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $D_1$ ) в уравнении (2.6). Разработан метод решения этой задачи, при котором следует составить и решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} H_0 = A_1 \\ H_1 = A_1 + B_1 \cdot \varepsilon_1^{D_1} \\ H_2 = A_1 + B_1 \cdot \varepsilon_2^{D_1} \\ H_3 = A_1 + B_1 \cdot \varepsilon_3^{D_1} \end{cases}, \quad (2.8)$$

где  $H$ - твердость материалы (HV или HB), в МПа.

На основе решения системы уравнений (2.8) с использованием результатов экспериментов, приведенных в таблице 2.3, получены коэффициенты и уравнение для расчета величины твердости (HV) в зависимости от обжатия  $\varepsilon$  при холодной прокатке полос из алюминиевого сплава АД33. Аппроксимирующее уравнение

зависимости между твердостью (HV) и относительным обжатием имеет вид:

$$HV = 49 + 1,102\varepsilon^{0,72}, \quad R^2 = 0,915 \quad (2.9)$$

Аналогический подход использовали при построении уравнения для расчета величины твердости (HB) от относительной деформации. Ниже приведено уравнение для определения твердости (HB) алюминиевого сплава АД33:

$$HB = 44,2 + 0,943\varepsilon^{0,71}, \quad R^2 = 0,914 \quad (2.10)$$

На основании полученных регрессионных уравнений построены графики зависимостей твердости сплава АД33 от обжатия при холодной прокатке, показанные на рисунке 2.12.

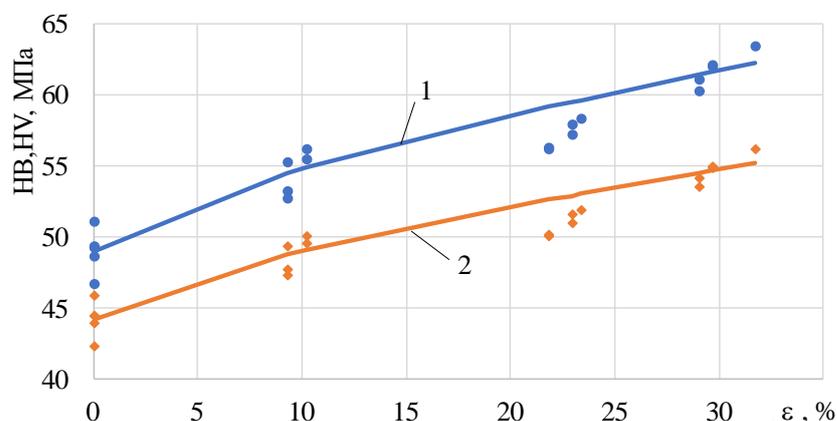


Рисунок 2.12 – Зависимость твердости HV (1) и HB (2) алюминиевого сплава АД33 от относительной деформации  $\varepsilon$  при холодной прокатке

График на рисунке 2.12 показывает, что твердость HV (1) и HB (2) монотонно увеличивается (практически по линейному закону). HV - медленно возрастает с 49 до 61,7 и HB - медленно возрастает с 44,2 до 54,7 при деформации от 0 ÷ 30%.

Испытания образцов на растяжение проводились по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [66] на испытательной машине Zwick/Roell Z250 со скоростью 5 мм/мин при температуре окружающего воздуха 23°C.

Результаты определения твердости и усредненных результатов испытаний

образцов на растяжение полос из алюминиевого сплава АД33 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Твердость и механические свойства прокатанных с различными обжатиями полос из алюминиевого сплава АД33

$\varepsilon$ , %	HV, МПа	НВ, МПа	$\sigma_{0,2}$ ( $\sigma_s$ ), МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\lg\delta$
0,0	46,70	42,31	70,00	146,00	30,40	1,48
0,0	48,60	43,88	70,00	146,00	30,40	1,48
0,0	49,20	44,37	70,50	146,00	29,35	1,47
0,0	49,30	44,45	70,50	146,00	29,35	1,47
0,0	51,00	45,86	71,00	146,00	28,30	1,45
9,3	52,70	47,26	146,00	158,00	21,40	1,33
9,3	53,20	47,67	147,00	158,00	21,25	1,33
9,3	55,20	49,32	147,00	158,00	21,25	1,33
10,2	55,40	49,49	148,00	158,00	21,10	1,32
10,2	56,10	50,07	148,00	158,00	21,10	1,32
21,9	56,10	50,07	170,00	175,00	14,10	1,15
21,9	56,20	50,15	170,00	175,00	14,10	1,15
23,0	57,20	50,97	170,00	175,00	11,35	1,05
23,0	57,90	51,55	170,00	175,00	11,35	1,05
23,4	58,30	51,88	170,00	175,00	11,30	1,05
29,0	60,20	53,45	173,00	182,00	11,40	1,06
29,0	61,00	54,11	173,00	182,00	11,40	1,06
29,7	61,90	54,85	173,50	183,00	11,20	1,05
29,7	62,00	54,94	173,50	183,00	11,20	1,05
31,7	63,40	56,09	174,00	184,00	11,00	1,04

Результаты экспериментального исследования, приведенные в таблице 2.4, позволяют установить зависимости сопротивления металла деформации (предел текучести)  $\sigma_s$ , временного сопротивления деформации  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  от твердости НВ и HV при прокатке полос из алюминиевого сплава АД33 [116]. После обработки экспериментальных данных методом

математической статистики получены уравнения для алюминиевого сплава АД33.

$$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = -0,583HV^2 + 72,13HV - 2054, \quad R^2 = 0,90 \quad (2.11)$$

$$\sigma_B = 2,858HV + 6,576, \quad R^2 = 0,89 \quad (2.12)$$

$$\delta = 0,0475HV^2 - 6,702HV + 243,31, \quad R^2 = 0,89 \quad (2.13)$$

где HV – Твердость металла по Виккерсу, МПа

Аналогический подход использовали при построении уравнения для расчета величины сопротивления металла деформации (предел текучести)  $\sigma_s$ , временного сопротивления деформации  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  от твердости HB:

$$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = -0,856HB^2 + 93,83HB - 2395, \quad R^2 = 0,90 \quad (2.14)$$

$$\sigma_B = 3,463HB - 6,453, \quad R^2 = 0,89 \quad (2.15)$$

$$\delta = 0,0697HB^2 - 8,644HB + 274,85, \quad R^2 = 0,89 \quad (2.16)$$

где HB – Твердость металла по Бринеллю, МПа

На основании полученных регрессионных уравнений построены графики зависимостей сопротивления деформации  $\sigma_{0,2}(\sigma_s)$ , временного сопротивления деформации  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  сплава АД33 от твердости, показанные на рисунках 2.13 и 2.14.

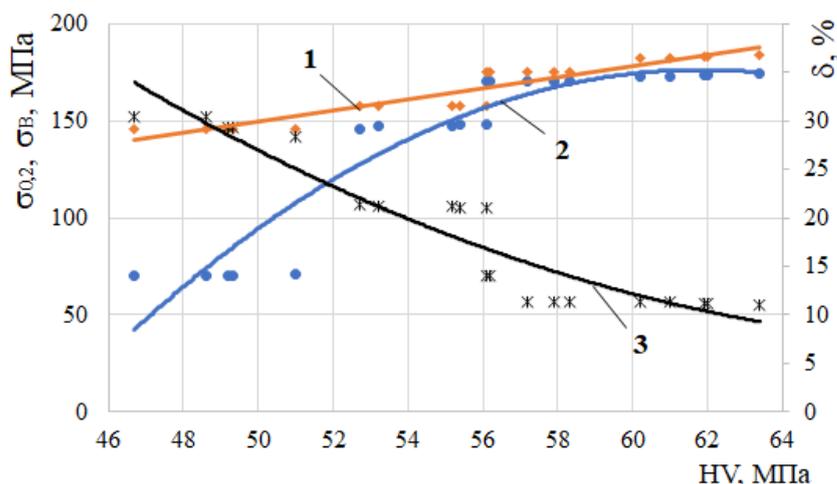


Рисунок 2.13 – Зависимости временного сопротивления  $\sigma_B$  (1), предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (сопротивления деформации  $\sigma_s$ ) (2) и относительного удлинения  $\delta$  (3) от твердости по Виккерсу (HV) сплава АД33 при холодной прокатке

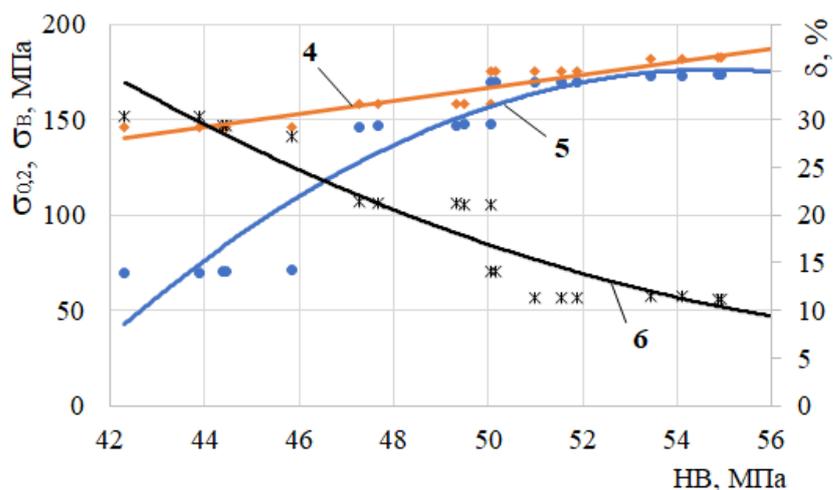


Рисунок 2.14 – Зависимости временного сопротивления  $\sigma_{\text{в}}$  (4), предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (сопротивления деформации  $\sigma_s$ ) (5) и относительного удлинения  $\delta$  (6) от твердости по Бринеллю (НВ) сплава АД33 при холодной прокатке

Анализ графиков последних двух рисунков показывает, что после прокатки величины предела прочности (временного сопротивления)  $\sigma_{\text{в}}$  связаны с показателями твёрдости (НВ или НV) линейными зависимостями, а предела текучести (сопротивления деформации)  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_s$ ) увеличивается с 70 до 174 МПа и показатель пластичности  $\delta$  уменьшается с 29,35 до 11,2% с ростом твердости проката по параболическому закону второй степени [116].

Использование полученных зависимостей позволяет на промышленных предприятиях по прокатке алюминия определять механические показатели: предел текучести, предел прочности и относительное удлинение проката из сплава АД33 по результатам измерения твердости без проведения испытаний сплава на разрыв.

## Выводы по главе 2

1. Оптико-эмиссионным спектральным методом проведены исследования химического состава материала полос, позволившие установить конкретный состав алюминиевого сплава, который соответствует марки АД33 по ГОСТу 4794–19.

2. Установлены закономерности изменения прочностных и пластической характеристик от степени холодной деформации полос алюминиевого сплава

АД33 известного химического состава. Показано, что временное сопротивление  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}(\sigma_s)$  с увеличением обжатия возрастают с различной интенсивностью:  $\sigma_B$  монотонно увеличивается (практически по линейному закону),  $\sigma_{0,2}(\sigma_s)$  - интенсивно возрастает с 70 до 160 МПа при обжатии от 0 ÷ 15%, а затем медленно увеличивается до 173,5 МПа при  $\varepsilon = 30\%$ . Показатель пластичности  $\delta$  уменьшается с 29,35 до 11,2% по параболическому закону второй степени.

3. Установлены закономерности изменения твердости от степени деформации и предела текучести (сопротивления деформации) от твердости при холодной прокатке полос из алюминиевого сплава АД33. Показано, что твердость HV и HB увеличивается монотонно практически по линейному закону: HV - возрастает с 49,0 до 61,7 и HB - медленно возрастает с 44,2 до 54,7 при увеличении обжатия от 0 ÷ 30%. Величины предела прочности (временного сопротивления)  $\sigma_B$  связаны с показателями твердости (HB или HV) линейными зависимостями, а предела текучести (сопротивления деформации)  $\sigma_{0,2}(\sigma_s)$  увеличивается с 70 до 174 МПа и показатель пластичности  $\delta$  уменьшается с 29,35 до 11,2% с ростом твердости проката по параболическому закону второй степени.

4. Получены адекватные регрессионные уравнения для расчета основных механических свойств от показателей твердости алюминиевого сплава АД33 при прокатке полос с обжатием до 30%.

5. Использование полученных регрессионных уравнений для расчета сопротивления металла деформации и других реологических свойств алюминиевого сплава АД33 найдет применение в системах автоматизированного проектирования (САПР) и для определения силовых показателей процессов холодной прокатки полос и лент.

6. Результаты исследования могут быть использованы на заводах по обработке алюминия при определении основных механических свойств прокатываемых полос и лент из сплава АД33 по измеренным показателям твердости, без проведения испытаний образцов на разрыв.

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК НА ПРОЦЕСС ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД33 И АМц**

#### **3.1 Экспериментальные исследования влияния технологических смазок на деформационные и силовые показатели при прокатке по длине полос из алюминиевых сплавов**

Прокатка алюминия - одна из наиболее развивающихся отраслей российской промышленности [118]. Современная прокатка алюминия и его сплавов невозможна без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). При холодной прокатке, как и в любом другом процессе прокатки, энергия, необходимая для осуществления пластической деформации полосы валками, передается фрикционным путем [58].

Известно, что применение СОЖ обеспечивает снижение коэффициента трения, уменьшение давления на контактной поверхности, понижение упругой деформации рабочего инструмента, что приводит к возрастанию величины обжатия и повышению эффективности процесса [50, 87, 91, 119-121]. Распределение давления по дуге контакта и его изменение при использовании различных смазок, а также сила прокатки зависят от толщины прокатываемой полосы, свойств смазок, влияющих на коэффициент контактного трения, от обжатия, диаметра валков и механических свойств полос (предела текучести и сопротивления металла деформации), зависящих от химического состава и технологий производства заготовок на предыдущих стадиях обработки.

В процессах прокатки полос применяют технологические смазки для улучшения качества полос и снижения нагрузок на оборудование. Эффективность использования смазок при прокатке и других процессов обработки металлов давлением посвящено много работ [46, 50, 51, 92, 98] и другие. Однако применение различных технологических смазок при холодной прокатке алюминиевого сплава АД33 не исследовано, что затрудняет разработку технологических решений по улучшению качества полос и лент из алюминиевого

сплава и оценку снижения нагрузок на оборудование.

Условия получения качественного прокатки во многом определяются эффективностью используемых технологических смазочных материалов при прокатке конкретных сплавов. Повышение уровня требований к показателям качества по длине полос и адекватное прогнозирование силовых показателей прокатки алюминия является актуальной задачей исследований, в том числе направленных на повышение степени научной обоснованности применения технологических смазок.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния различных технологических смазок на деформационно-силовые показатели при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц с исходными размерами 3x25x190 мм и 1,9x24x148 мм. Опытную прокатку полос провели на лабораторном двухвалковом стане 150x235 с фактическим диаметром валков 141,6 мм, установленном в лаборатории кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» (ОМДиАТ) Московского политехнического университета (см. рис. 2.3). Среднее значение шероховатости валка двухвалкового стана 150x235 составляет  $R_z = 1,6 \text{ мкм}$ .

Представлены результаты экспериментального исследования влияния различных технологических смазок на деформационно-силовые показатели при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц с исходными размерами 3,0x25x190 мм и 2,0x25x190 мм на лабораторном двухвалковом стане 150x235. Проведена прокатка восемнадцати полос из алюминиевого сплава АД33 и двенадцати полос из алюминиевого сплава АМц с одинаковыми обжатиями  $\varepsilon \approx 20\%$  и с разными смазками, в том числе: шесть полос (три - АД33, три - АМц); три полосы (АД33) с подсолнечным маслом (5%); три полосы (АД33) со смазками СПЗ (6%); шесть полос (три - АД33, три - АМц) с индустриальным маслом И40 (5%); шесть полос (три - АД33, три - АМц) с пальмовым маслом и шесть полос (три - АД33, три - АМц) с керосином. Двенадцати полос из сплава АД33 с керосином с обжатиями  $\varepsilon \approx 30\%$ , 40% и 50%. Измерение размеров полос до и после прокатки проводили электронным штангенциркулем с погрешностью

$\pm 0,01$  мм [122].

Коэффициент трения при холодной прокатки определяли по известной и широко применяемой формуле А.П. Грудева, в которой учитываются следующие переменные:

$$\mu = f(\varepsilon, v_B, \vartheta_{50}, R_z, K_{cm}), \quad (3.1)$$

где:  $R_z$  – среднее значение шероховатости вала двухвалкового стана 150x235 ( $R_z = 1,6$  мкм);  $\vartheta_{50}$  – кинематическая вязкость смазки при 50°C,  $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-2}$ ;  $v_B$  – скорость прокатки, м/с;  $K_{cm}$  – коэффициент, учитывающий природу смазки. Для растительных масел  $K_{cm} = 1,0$ , для минеральных  $K_{cm} = 1,4$ .

Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения: с керосином -  $\mu = 0,071$ ; со смазкой пальмовым маслом –  $\mu = 0,074$ ; с СПЗ –  $\mu = 0,074$ ; с И40 (5%) –  $\mu = 0,075$  и с подсолнечным маслом (5%) –  $\mu = 0,08$ . При холодной прокатке алюминия в сухих валах коэффициент трения составляет  $\mu = 0,095$  [40].

Выходную продольную разнотолщинность полосы определяют, как разницу толщины по середине полосы  $h_c$  и на ее концевом участке  $h_{ki}$ :

$$\delta h = h_c - h_{ki}, \quad (3.2)$$

Отклонение от номинала толщины по длине полосы называют продольной разнотолщинностью. Продольная разнотолщинность отрицательно влияет не только на механические свойства металла, но и на качество готовых изделий из проката [43].

Средние измеренные значения толщины и ширины полос, а также сил прокатки в трех участках длины проката: в начале (1), в середине (2) и в конце (3) до и после деформации, а также обжатие  $\varepsilon$  приведены в таблице 3.1.

Результаты экспериментов приведены в таблице 3.1, включают параметры и показатели процесса прокатки:  $h_0$  – толщина и  $b_0$  – ширина по длине полос до прокатки;  $h_1$  – толщина и  $b_1$  – ширина по длине полос после прокатки в начале (1), в середине (2) и в конце (3) каждой полосы;  $\delta h$  – продольная разнотолщинность полосы после прокатки;  $l_1$  – длина полосы после прокатки;  $\varepsilon = 100 \cdot (h_0 - h_1) / h_0$  –

вычисленная величина относительного обжатия на трех участках по длине полосы;  $P_3$  – значение суммарной силы прокатки, измеренной датчиками под левым и правым нажимными винтами при деформации.

Таблица 3.1 - Параметры и показатели процесса прокатки по длине полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц с технологическими смазками на стане 150x235.

Сплав	Смазка, μ	Место	$h_0$ , мм	$b_0$ , мм	$h_1$ , мм	$b_1$ , мм	$\delta h$ , мм	$l_1$ , мм	$\varepsilon$ , %	$P_3$ , кН
АД33	Без смазки, 0,095	1 (Н)	3,02	25,60	2,35	26,13	0,04	0	22,19	23,68
		2 (С)	3,04	25,60	2,39	26,00		119,5	21,38	42,86
		3 (К)	3,02	25,60	2,33	26,29	0,06	239	22,85	23,28
	СПЗ (6%), 0,08	1 (Н)	3,03	25,48	2,34	26,10	0,02	0	22,77	24,14
		2 (С)	3,02	25,42	2,36	25,59		120	21,85	39,65
		3 (К)	3,03	25,44	2,33	26,19	0,03	240	23,10	24,01
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	3,04	25,68	2,35	26,25	0,02	0	22,70	24,24
		2 (С)	3,04	25,47	2,37	25,72		120,5	22,04	37,58
		3 (К)	3,05	25,52	2,34	26,51	0,03	241	23,28	23,31
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	3,03	25,65	2,35	26,19	0,01	0	22,44	24,71
		2 (С)	3,03	25,45	2,36	25,61		120,5	22,11	37,57
		3 (К)	3,02	25,48	2,31	26,09	0,05	241	23,51	23,4
	Под.Масло, (5%) 0,074	1 (Н)	3,00	25,34	2,33	25,88	0,03	0	22,33	24,35
		2 (С)	3,03	25,35	2,36	25,58		120,5	22,11	37,57
		3 (К)	3,02	25,37	2,31	26,35	0,05	241	23,51	23,45
	Керосин 0,071	1 (Н)	2,00	25,39	1,55	26,10	0,01	0	22,50	19,01
		2 (С)	2,00	25,45	1,56	26,00		120,5	22,00	35,99
		3 (К)	2,00	25,53	1,54	26,50	0,02	241	23,00	20,79
АМц	Без смазки, 0,095	1 (Н)	1,90	24,0	1,53	24,26	0,02	0	19,47	13,43
		2 (С)	1,90	24,0	1,55	24,25		90,0	18,42	22,05
		3 (К)	1,90	24,0	1,52	24,48	0,03	180	20,00	13,75
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	1,90	24,0	1,51	24,46	0,01	0	20,53	13,60
		2 (С)	1,90	24,0	1,52	24,30		89,5	20,00	20,86
		3 (К)	1,90	24,0	1,51	24,45	0,01	179	20,53	13,82
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	1,90	24,0	1,50	24,68	0,02	0	21,05	13,70
		2 (С)	1,90	24,0	1,52	24,30		90,0	20,00	20,16
		3 (К)	1,90	24,0	1,51	24,85	0,01	180	20,53	13,95
	Керосин, 0,071	1 (Н)	1,90	24,0	1,49	24,23	0,02	0	21,58	13,75
		2 (С)	1,90	24,0	1,51	24,12		92,0	20,53	20,85
		3 (К)	1,90	24,0	1,49	24,66	0,02	184	21,58	14,05

### **3.1.1 Влияние технологических смазок на силовые и деформационные показатели основной части полосы**

Применение технологических смазок и СОЖ приводит к уменьшению коэффициента контактного трения [6, 85], снижению сил и в целом энергосиловых параметров прокатки [50, 92]. Наличие трения и величина сил трения определяют захватывающую способность валков, в том числе и при тонколистовой прокатке, и при установившемся процессе влияют на степени деформации по толщине и ширине металла. Силы внешнего трения, требуя дополнительной работы на их преодоление, вызывают повышение сопротивления и энергии деформации [46]. Исследовали влияния различных смазок на деформационные и силовые показатели при прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц.

Результаты эксперимента подтвердили положительное влияние технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких алюминиевых полос и позволили количественно определить влияние условий контактного трения на эти показатели при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц (см. табл. 3.1).

Результаты исследования подтвердили известные положения об уменьшении толщины полос на концевых участках по сравнению с серединой полосы. Разнотолщинность полос изменяется в пределах 0,01...0,07 мм в зависимости от деформационных условий прокатки и применяемых смазочных материалов. Показано, что применение технологических смазок позволяет в 1,6-2,0 раза уменьшать продольную разнотолщинность полос.

Экспериментально установлено, что при прокатке со смазками разница между деформационными и силовыми показателями на концевых участках и в средней части полос меньше, чем при прокатке полос в сухих валках.

На основании результатов исследований были построены графики влияния различных условий контактного трения на силу прокатки и относительную деформацию при деформации опытных полос (рис. 3.1 – 3.2).

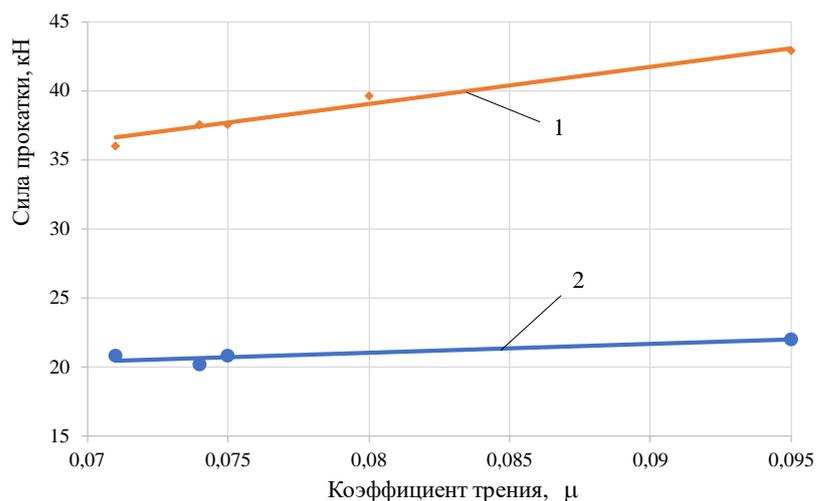


Рисунок 3.1 – Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего различным смазкам на силу при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 (1) и АМц (2) на стане 150x235

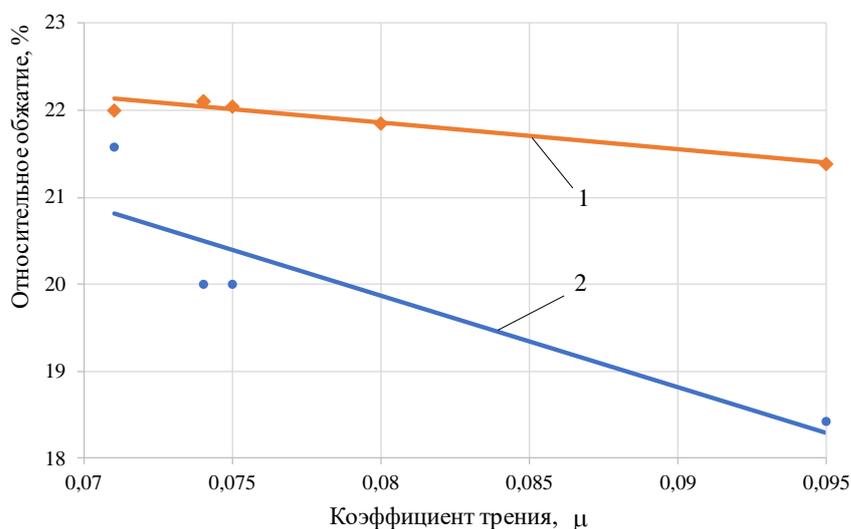


Рисунок 3.2 – Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего различным смазкам на обжатие при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 (1) и АМц (2) на стане 150x235

**Влияние смазок на силы прокатки.** При прокатке полос из сплава АД33 сила прокатки уменьшается на 3,21 кН (7,5%) при технологической смазке СПЗ (6%); при смазке индустриальным маслом И40 (5%) - на 5,28 кН (12,32%); подсолнечным маслом (5%) – на 5,29 кН (12,34%); пальмовым маслом – на 5,29 кН (12,34%) и керосином – на 6,87 кН (16,0%). При прокатке полос из сплава АМц сила прокатки уменьшается на 1,19 (5,40%) при смазке индустриальным

маслом И40(5%); на 1,89 кН (8,57%) - при смазке пальмовым маслом и керосином - на 1,2 кН (5,44%) по сравнению с деформацией в сухих валках.

Наиболее эффективно действует смазка валков индустриальным И40 (5%), подсолнечным (5%) и пальмовым маслами и особенно керосином при прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц, что необходимо учитывать при разработке технологических режимов прокатки полос, листов и лент на заводах. Однако рациональная смазка для прокатки полос из сплава АМц пока не подобрана.

**Влияние смазок на степень деформации.** Результаты исследований показали, что условия контактного трения влияют на деформационные показатели прокатки. На рисунке 3.2 показано влияние коэффициента трения на изменение величины относительного обжатия при прокатке опытных полос в фиксированных исходных зазорах ненагруженных валков. Улучшенные условия контактного трения позволяют увеличить обжатие металла и уменьшить толщину полос на выходе из стана без изменения зазора между валками. При прокатке полос из алюминиевого сплава АД33 в сухих валках ( $\mu = 0,095$ ) в основной части среднее относительное обжатие  $\varepsilon = 21,38\%$ ; при технологической смазке СПЗ (6%) ( $\mu = 0,08$ ) относительное обжатие увеличилось до  $\varepsilon = 21,85\%$  (2,2%); индустриальным И40 (5%) ( $\mu = 0,075$ )  $\varepsilon = 22,04\%$  (3,0%); пальмовым ( $\mu = 0,074$ )  $\varepsilon = 22,11\%$  (3,3%); подсолнечным (5%) ( $\mu = 0,074$ )  $\varepsilon = 22,11\%$  (3,3%) и керосином ( $\mu = 0,071$ )  $\varepsilon = 22,00\%$  (2,8%) по сравнению с деформацией в сухих валках. При прокатке полос АМц в сухих валках ( $\mu = 0,095$ ) в основной части среднее относительное обжатие  $\varepsilon = 18,42\%$ ; технологической смазке индустриальным И40 (5%) ( $\mu = 0,075$ ) относительное обжатие увеличилось до  $\varepsilon = 20,00\%$  (7,9%); пальмовым ( $\mu = 0,074$ )  $\varepsilon = 20,00\%$  (7,9%) и керосином ( $\mu = 0,071$ )  $\varepsilon = 20,53\%$  (10,3%) по сравнению с деформацией в сухих валках.

### **3.1.2 Влияние технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких алюминиевых полос**

По результатам опытных прокаток, представленных в таблице 3.1, построили графики распределения толщины по длине полос из алюминиевых сплавов при использовании различных технологических смазок (см. рис. 3.3).

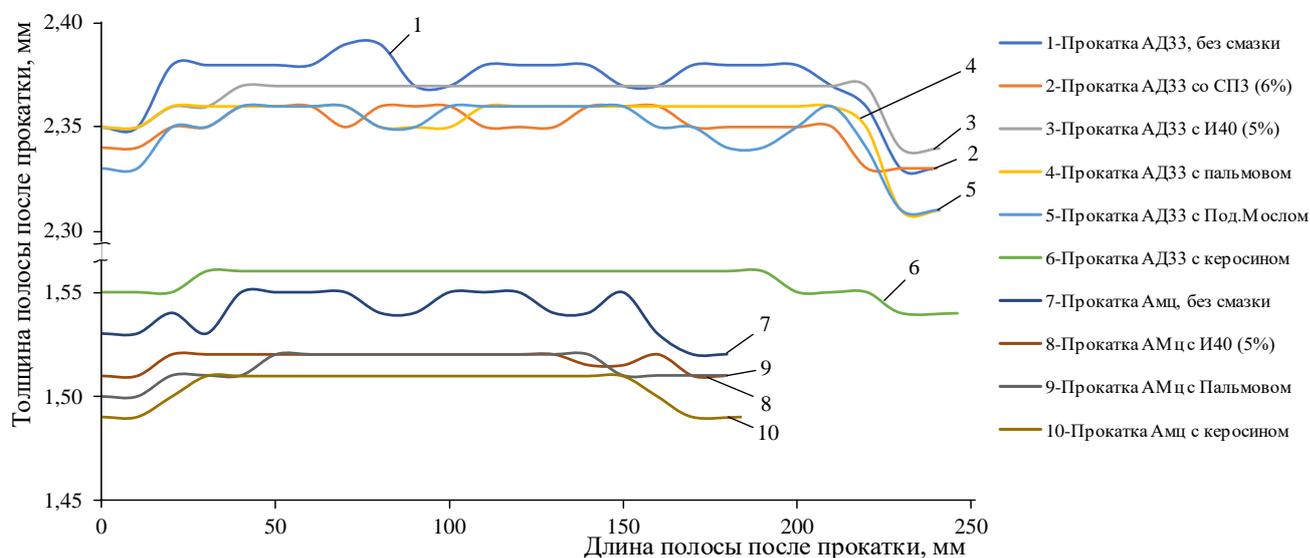


Рисунок 3.3 – Влияние смазок на толщину по длине тонких алюминиевых полос из сплавов АД33 и АМц при холодной прокатке

АД33: 1 – прокатка без смазки; 2 - прокатка со смазкой СПЗ (6%); 3 - прокатка с пальмовым маслом; 4- прокатка со смазкой И40 (5%); 5 - прокатка с подсолнечным маслом (5%) и 6 – прокатка с керосином.

АМц: 7 –прокатка без смазки; 8- прокатка со смазкой И40 (5%); 9 - прокатка с пальмовым маслом и 10 – прокатка с керосином.

Результаты эксперимента и сравнение с величинами самой большой продольной разнотолщинности при прокатке полос из алюминиевых сплавов в сухих валках показали, что при смазке СПЗ (6%) продольная разнотолщинность ниже, чем при сухих валках на 50% (АД33); при смазке индустриальным маслом И40 (5%) - на 50% (АД33) и 66,7% (АМц); подсолнечным маслом (5%) и пальмовым маслом - на 16,7% (АД33) и 33,3% (АМц); и керосином - на 66,7% (АД33) и 33,3% (АМц) (см. рис. 3.3).

Анализ показателей, приведенных в таблице 3.1, позволил установить количественные закономерности распределения толщины по длине полос после прокатки с различными технологическими смазками. Результаты исследования подтвердили известные положения об уменьшении толщины полос на концевых

участках, по сравнению со серединой полосы, и увеличении уширения на концевых участках, по сравнению с уширением в ее средней части.

Обработка результатов опытных прокаток полос из сплавов АД33 и АМц с обжатием около 20% позволила построить кривые распределения сил и относительных деформаций по длине проката при различных технологических смазках (см. рис. 3.4 – 3.7).

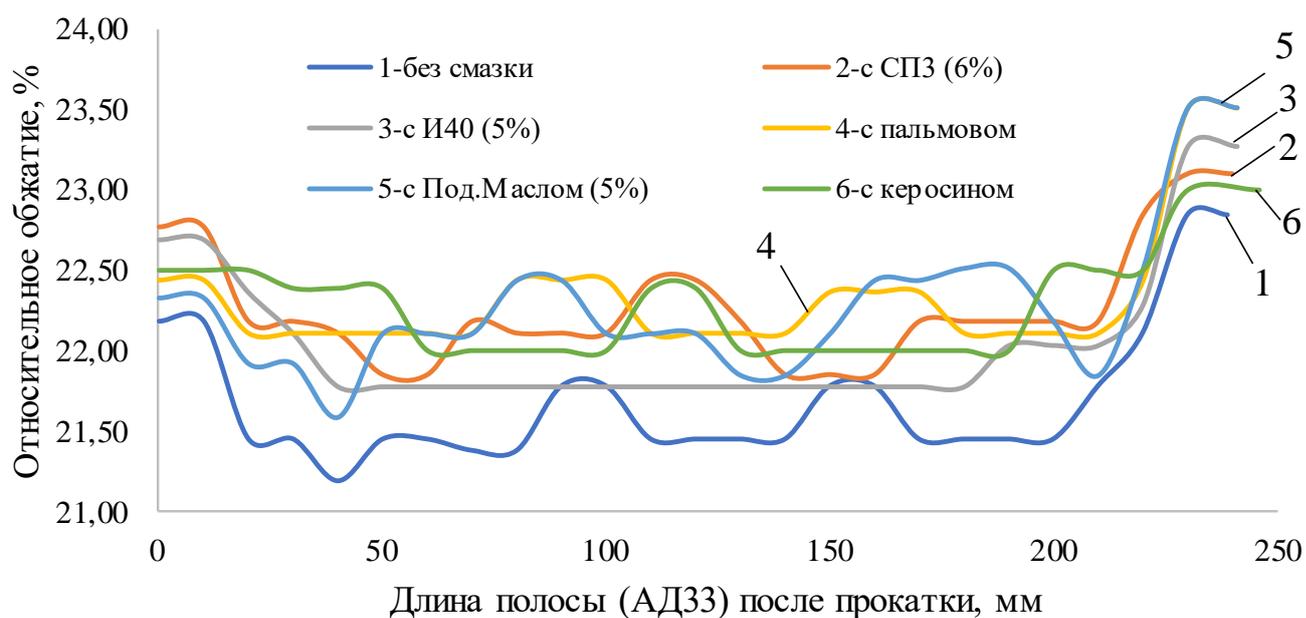


Рисунок 3.4 – Влияние смазок на относительной обжатии по длине тонкими алюминиевого полосы (АД33) при холодной прокатке

(1 – прокатка без смазки; 2 - прокатка со смазкой СПЗ (6%); 3 - прокатка с пальмовым маслом; 4- прокатка со смазкой И40 (5%); 5 - прокатка с подсолнечным маслом (5%) и 6 – прокатка с керосином)

Анализ кривых распределений относительных обжатий по участкам длин полос показал, что при одинаковой настройке валков (начальный зазор был предварительно установлен на стане) при прокатке с разными технологическими смазками относительные деформации полос при прокатке сплав АД33 в сухих валках составили на переднем участке 1 (н) – 22,19% и на заднем конце 3 (к) – 22,85% больше, чем деформация в их средней точке (21,38%) на 3,62% и 6,42%; при смазке СПЗ (6%) на переднем участке – 4,03% и на заднем конце – 5,4%; при смазке индустриальным И40 (5%) на 2,9% и 5,32%; при смазке пальмовым маслом

(5%) на 1,47% и 5,95%; при смазке подсолнечным на 0,99% и 5,95% и керосином эти погрешности – 2,22% и 4,35% в соответствии (см. рис. 3.4).

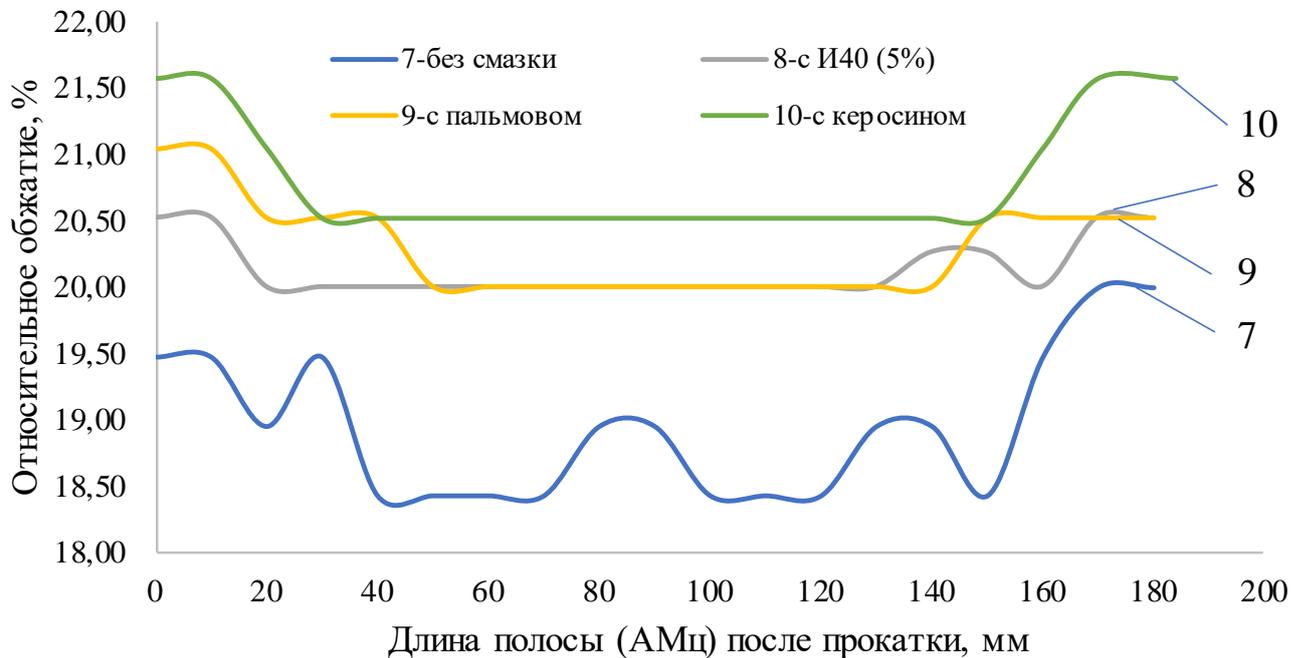


Рисунок 3.5 – Влияние смазок на степень деформации по длине тонкими алюминиевого полосы (АМц) при холодной прокатке

(7 – прокатка без смазки; 8- прокатка со смазкой И40 (5%); 9 - прокатка с пальмовым маслом и 10 – прокатка с керосином)

При прокатке сплав АМц: в сухих валках составили на переднем участке 1 (н) – 19,47% и на заднем конце 3 (к) – 20% больше, чем деформация в их средней точке (18,42%) на 5,41% и 7,89%; при смазке индустриальным И40 (5%) на переднем участке – 2,56% и на заднем конце – 2,56%; при смазке пальмовым маслом (5%) на 5,0% и 2,56% и керосином эти погрешности – 4,88% и 4,88% в соответствии (см. рис. 3.5).

Очевидно, что при прокатке со смазками разница между деформационными и силовыми показателями в концевых участках и средней части ниже, чем при прокатке полос в сухих валках.

По сравнению с деформацией полос из алюминиевого сплава АД33 в сухих валках, при технологической смазке СПЗ (6%) степень деформации в начальной

точке больше, чем при сухих валках 2,58%, в середине полос – 2,16% и в концевой точке – 1,1%; при технологической смазке индустриальным И40 (5%) в начальной точке – 2,26%, в середине полос – 3,0% и в концевой точке – 1,85%; при смазке валков пальмовым маслом (5%) в начальной точке – 1,14%, в середине полос – 3,3% и в концевой точке – 2,82%; при смазке подсолнечным в начальной точке – 0,66%, в середине полос – 3,3% и в концевой точке – 2,82%; при технологической смазке керосином в начальной точке – 1,4%, в середине полос – 2,81% и в концевой точке – 0,66% (см. табл. 3.1 и рис. 3.4). По сравнению с деформацией полос из алюминиевого сплава АМц в сухих валках, при технологической смазке индустриальным И40 (5%) степень деформации в начальной точке больше, чем при сухих валках 5,13%, в середине полос – 7,89% и в концевой точке – 2,56%; при технологической смазке пальмовым маслом в начальной точке – 7,5%, в середине полос – 7,89% и в концевой точке – 2,56%; при смазке керосином в начальной точке – 9,76%, в середине полос – 10,26% и в концевой точке – 7,32% (см. табл. 3.1 и рис. 3.5).

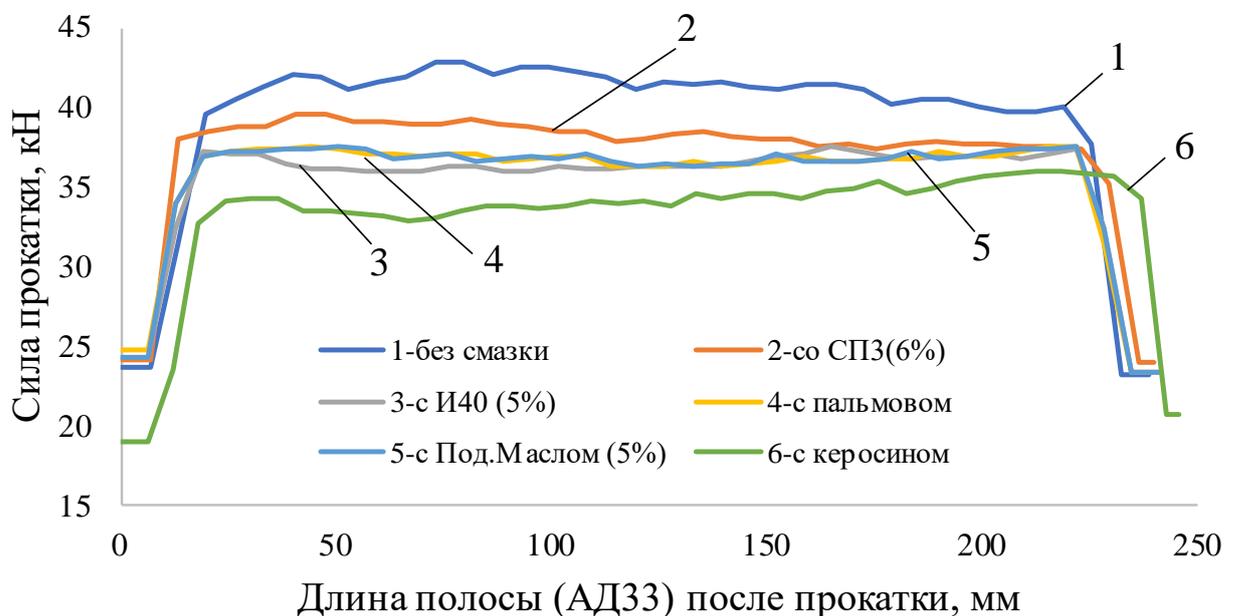


Рисунок 3.6 – Влияние смазок на силу прокатки по длине тонкими алюминиевого полосы (АД33) при холодной прокатке

(1 – прокатка без смазки; 2 - прокатка со смазкой СПЗ (6%); 3 - прокатка с пальмовым маслом; 4- прокатка со смазкой И40 (5%); 5 - прокатка с подсолнечным маслом (5%) и 6 – прокатка с керосином)

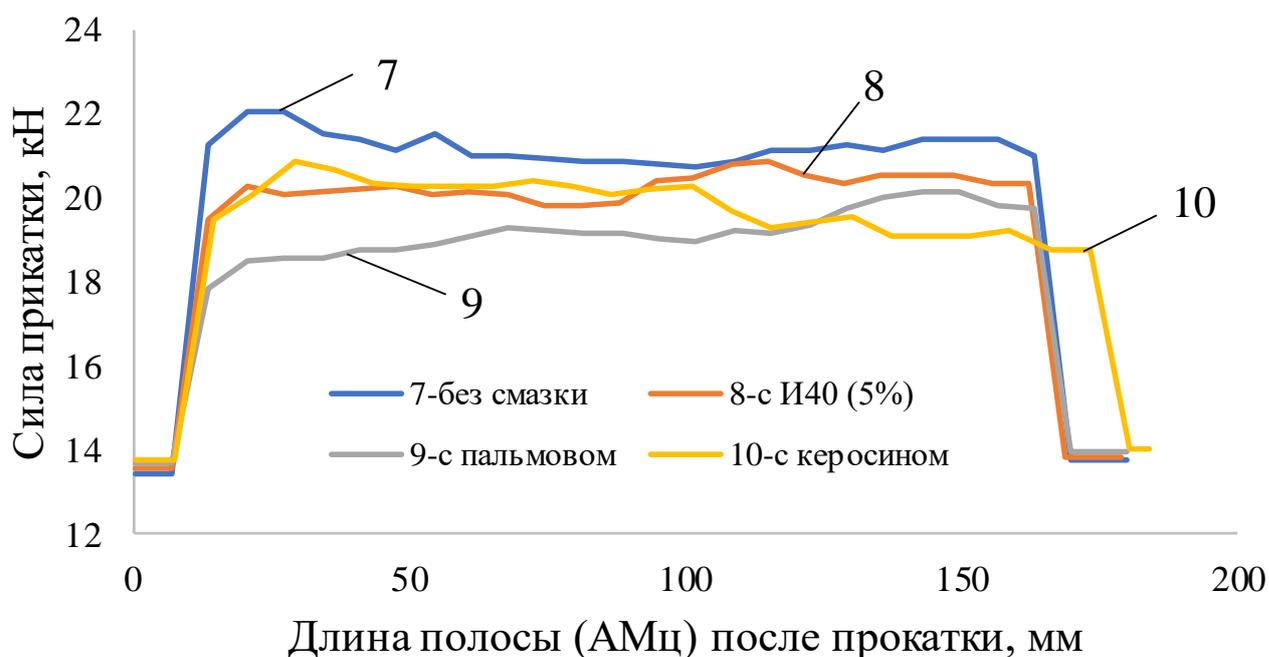


Рисунок 3.7 – Влияние смазок на силу прокатки по длине тонкими алюминиевого полосы (АМц) при холодной прокатке

((7 – прокатка без смазки; 8- прокатка со смазкой И40 (5%); 9 - прокатка с пальмовым маслом и 10 – прокатка с керосином)

Анализ кривых распределений сил по участкам длин полос из сплава АД33 показал, что при прокатке в сухих валках - силы прокатки составили на переднем участке 23,68 кН, на заднем – 23,28 кН и 42,86 кН в средней части, разница между силами прокатки в концевых участках и средней части составляет 19,18 кН (44,8%) и 19,58 кН (45,7%); при технологической смазке СПЗ (6%) – 15,51 кН (39,1%) и 15,64 кН (39,4%); индустриальным И40 (5%) – 13,34 кН (35,5%) и 14,27 кН (38%); пальмовым маслом – 12,86 кН (34,2%) и 14,17 кН (37,7%); подсолнечным маслом – 13,22 кН (35,2%) и 14,12 кН (37,6%) и керосином – 16,98 кН (47,2%) и 15,2 кН (42,2%) соответственно. Аналогический анализ при прокатке полос из сплава АМц показал, что при прокатке в сухих валках - силы прокатки составили на переднем участке 13,43 кН, на заднем – 13,75 кН и 22,05 кН в средней части, разница между силами прокатки в концевых участках и средней части составляет 8,62 кН (39,1%) и 8,3 кН (37,6%); при технологической смазке индустриальным И40 (5%) – 7,26 кН (34,8%) и 7,04 кН (33,7%); пальмовым

маслом – 6,46 кН (32,0%) и 6,21 кН (30,8%) и керосином – 7,1 кН (34,0%) и 6,8 кН (32,6%) соответственно. Измерения показали, что сила прокатки при деформировании концевых участков полос в 1,3-1,7 раз меньше, чем средней части раската. Показано, что применение смазок уменьшает разницу сил прокатки между концевыми участками и средней частью полосы и стабилизирует процесс деформирования (см. рис. 3.6 – 3.7).

При сравнении с деформацией полос из алюминиевого сплава АД33 в сухих валках, при технологической смазке СПЗ (6%) сила прокатки в начальной (24,14 кН) и концевой (24,01 кН) точке по длине полос больше, чем в начальной (23,68 кН) и концевой (23,28 кН) точке. Разница данных сил в начальной и концевой точке составляет 0,46 кН и 0,73 кН соответственно; индустриальным маслом И40 (5%) в начальной – 0,56 кН и в концевой точке 0,03 кН; пальмовым маслом в начальной – 1,03 кН и в концевой точке 0,12 кН; подсолнечным маслом (5%) в начальной – 0,67кН и в концевой точке 0,17кН. Аналогичский анализ при прокатке полос из сплава АМц в сухих валках, разница данных сил в начальной и концевой точке при технологической смазке индустриальным И40 (5%) составляет 0,17 кН и 0,07 кН соответственно; пальмовым маслом в начальной – 0,27 кН и в концевой точке 0,2кН и керосином в начальной – 0,32 кН и в концевой точке 0,3 кН.

Сила прокатки в середине полос при прокатке со смазками меньше, чем при прокатке в сухих валках (см. рис. 3.6 – 3.7).

Результаты исследования позволили установить количественные закономерности влияния различных технологических смазок на деформационные и силовые показатели холодной прокатки и размеры по длине тонких полос из алюминиевых сплавов из промышленных партий, а также оценить точность расчета этих параметров на разработанной компьютеризированной имитационной модели.

### 3.2. Усовершенствование моделей контактного давления для повышения точности расчета сил прокатки по длине тонких алюминиевых полос и лент

Проектирование режимов прокатки лент, полос и листов предполагает использование адекватных моделей для расчета контактного давления и силы прокатки, в том числе и по длине. Требуется количественная оценка влияния определяющих факторов на давление и силу прокатки. Известно, что определяющее влияние, наряду с площадью контактной поверхности металла с валками, на формирование силы прокатки оказывает контактное давление, которое зависит от сопротивления металла деформации и напряженного состояния полосы. В работах [40, 51, 64, 65, 123, 124] установлено, что на напряженное состояние полосы влияют средний коэффициент напряженного состояния в очаге деформации  $n_{cp}$ , коэффициент влияния внеконтактных зон на очаг деформации  $n_{\sigma}$ , коэффициент влияния натяжения  $n_H$ . Предварительный анализ показал, что применение различных уравнений для расчета среднего коэффициента напряжения состояния  $n_{cp}$  приводит к ошибкам определения давления и соответственно силы прокатки в 2-4 раза. Экспериментальная проверка использования различных уравнений для расчета  $n_{cp}$  позволит оценить их точность и применимость при проектировании режимов прокатки тонких полос из алюминия. Изменение жесткости и толщины по длине прокатываемой полосы оказывает влияние на значение коэффициента влияния внешних частей полосы  $n_b$  на очаг деформации, что необходимо учитывать при определении среднего давления.

На рисунках. 3.8 и 3.9 показаны диаграммы распределения сил прокатки по длине алюминиевых АД33 полос с обжатием ~20% при прокатке со смазкой И40 (5%) валков на двухвалковом стане 150x235.

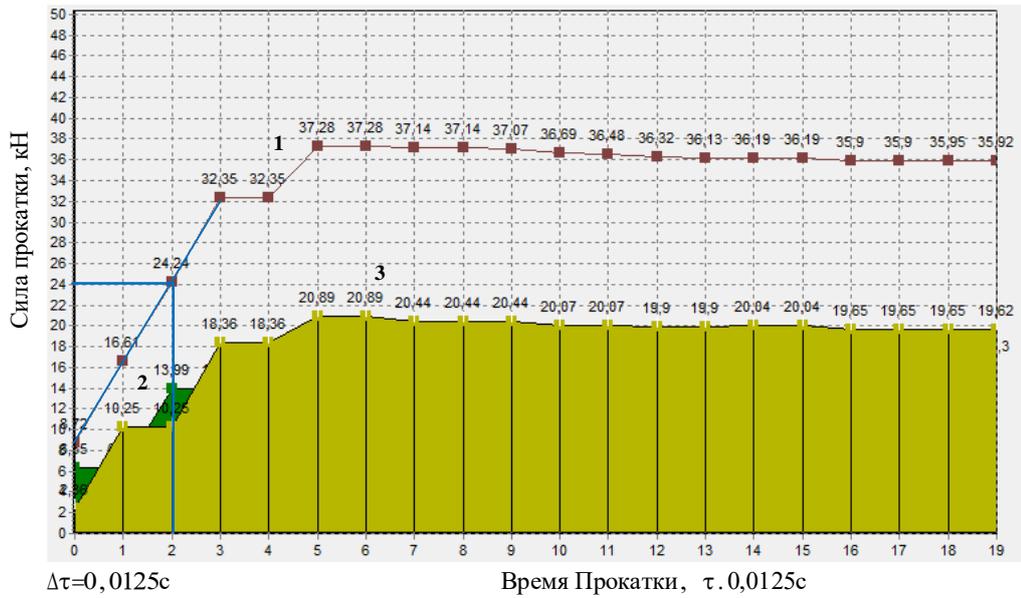


Рисунок 3.8 – Распределение сил прокатки по длине алюминиевой полосы с обжатием 20% со смазкой И40-5% валков, измеренных на стане 150x235 (в начале): 1 - суммарная сила; 2, 3 - силы прокатки под левым и правым нажимными винтами соответственно

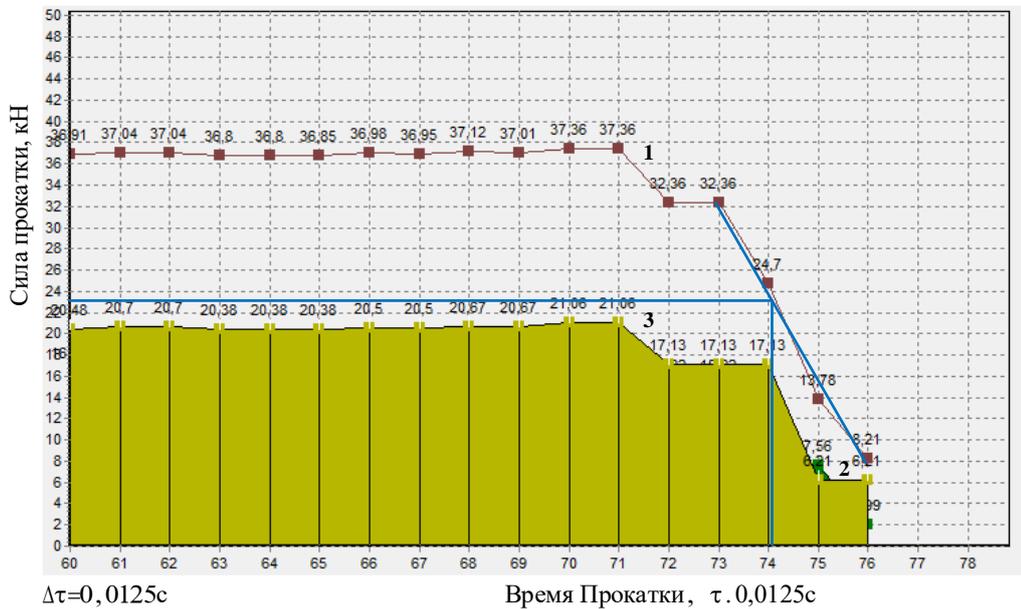


Рисунок 3.9 – Распределение сил прокатки по длине алюминиевого полосы с обжатием 20% со смазкой И40-5% валков, измеренных на стане 150x235 (в конце): 1 - суммарная сила; 2, 3 - силы прокатки под левым и правым нажимными винтами соответственно

Видно, что распределение силы прокатки по длине полосы существенно неоднородно (см. рис. 3.8 и рис. 3.9). При прокатке начала полосы сила принимает минимальное значение, и возрастает с момента захвата полосы валками до установившегося процесса прокатки и, напротив, уменьшается от установившегося процесса при прокатке основной части полосы к концевому участку. На распределение силы по длине полосы, по-видимому, оказывает влияние условия деформации, напряженного состояния и влияние внешних частей полосы на очаге деформации.

Исследовано влияние определяющих факторов и точности уравнений при расчете давления и силы прокатки по длине тонких полос из алюминиевого сплава АД33.

При вычислении значения силы прокатки  $P$ , если рассматривать  $P$  как функцию с независимыми переменными, мы можем выделить существование основных групп переменных: 1 - группа геометрии валков и полосы ( $R, h_0, h_1, b$ ); 2 - группа свойств, характеризующая условия контактного трения и сопротивления пластической деформации ( $\mu, \sigma_s$  - определяется экспериментально); 3-я группа внешних напряжений (натяжений) до и после деформации ( $\sigma_0, \sigma_1$ ), которые специально создаются и изменяются для обеспечения стабильного и эффективного режима прокатки.

Сила прокатки в прикладных расчетах на участке полосы определяется по известному уравнению (1.13):

$$P = p_{cp} \cdot F_k,$$

На основе анализа работ [40, 43, 56, 64, 65, 87, 123-125] и факторов, влияющих на контактное давление при прокатке полос без натяжения, с целью повышения точности расчета контактного давления основной части полосы можно использовать формулу для расчета среднего контактного давления:

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot n_{cp} \cdot (n_{\sigma} \cdot n_b)^{0,5}, \quad (3.3)$$

где:  $\sigma_{scp}$  - среднее значение сопротивления деформации, Н/мм<sup>2</sup>;  $n_{cp}$  - коэффициент

напряженного состояния;  $n_b$  - коэффициент, учитывающий влияние внешних частей полосы на очаг деформации;  $n_\sigma$  - коэффициент, учитывающий влияние внешних зон на очаг деформации.

Коэффициент  $n_b$  рассчитывается по формуле [51]:

$$n_b = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{ср}} \frac{h_1}{h_{ср}}, \quad (3.4)$$

где:  $\sigma_{s1}$  - сопротивления металла деформации на выходе из валков.

По результат эксперимента, длина очага деформации составила  $1 \leq l_d/h_{ср} \leq 4$ , тогда значение коэффициента  $n_\sigma$  можно определить по формуле [64]:

$$n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{ср}} \right)^{0.5}, \quad (3.5)$$

По результатам опыта, при прокатке тонких полос из алюминиевого сплава АД33, влияние внешних зон на силу прокатки показана на рисунке 3.10.

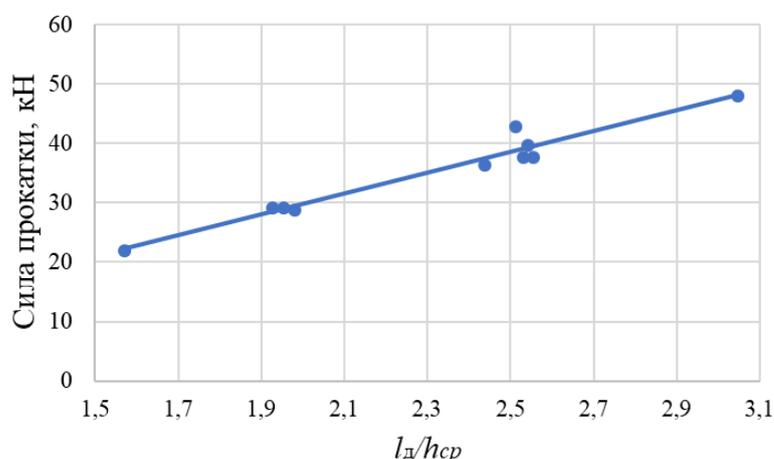


Рисунок 3.10 – Сила прокатки  $P_3$  в установившемся процессе прокатки полос из алюминиевого сплава АД33 в зависимости от отношения  $l_d/h_{ср}$  при прокатке тонких полос

Средний коэффициент напряженного состояния, полученный А.И. Целиковым методом тонких сечений, определяют по формуле (1.19):

$$n_{cp} = \frac{2(1-\varepsilon)h_H}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left( \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^\delta - 1 \right),$$

С использованием результатов экспериментального исследования при прокатке с обжатием 20% полос из алюминиевого сплава АД33 со смазкой И40 (5%), проведем количественный анализ точности известных и адекватности предлагаемых уравнений расчета давлений и сил при деформации различных участков по длине полосы. Исходные данные приведены в таблице 3.1. Прокатка проведена на двухвалковом стане 150x235 в рабочих валках с фактическим радиусом  $R = 70,8$  мм.

Вычислим среднее давление  $p_p$ , учитывающее влияние внешних частей и внешний зон полосы на очаг деформации по формуле (3.3) при прокатке основного участка полосы, т.е в средней части. Предварительно определим основные переменные.

Вычислим значение коэффициента  $n_b$  по формуле (3.4):

$$n_b = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{scp}} \frac{h_1}{h_{cp}} = \frac{165,88}{118,19} \frac{2,37}{2,71} = 1,23$$

Определим значение коэффициента  $n_\sigma$  по формуле (3.5):

$$n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{0,5} = \left( \frac{6,89}{2,71} \right)^{0,5} = 1,60;$$

$$h_H = \sqrt{h_0 h_1} = \sqrt{3,04 \cdot 2,37} \approx 2,68 \text{ мм};$$

$$\delta = \frac{2\mu l_d}{\Delta h} = \frac{2 \cdot 0,075 \cdot 6,89}{0,67} = 1,542.$$

Средний коэффициент напряженного состояния, рассчитанный по формуле (1.19), равен:

$$n_{cp} = \frac{2(1-\varepsilon)h_H}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left( \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^\delta - 1 \right) = \frac{2 \cdot (1-0,22) \cdot 2,68}{0,22 \cdot (1,542-1) \cdot 2,37} \left( \left( \frac{2,68}{2,37} \right)^{1,542} - 1 \right) = 3,09$$

С учетом определения переменных вычислим давление на установившемся

участке (2) полосы по формуле (3.3) и получим:

$$p_{cp2} = 1,15\sigma_{ср} n_{cp} (n_{\sigma} n_b)^{0,5} = 1,15 \cdot 118,19 \cdot 3,09 \cdot (1,6 \cdot 1,23)^{0,5} = 589,18 \text{ Н/мм}^2$$

Вычислим с учетом полученного значения  $p_{cp2}$  силу прокатки:

$$P_{расч2} = p_{cp2} \cdot F_K = 589,2 \cdot 176,28 \cdot 10^{-3} = 103,86 \text{ кН}$$

При сравнении расчетного значения усилия  $P_{расч2}=103,86$  кН со значением, измеренным в установившийся период прокатки  $P_{э2} = 37,58$  кН, погрешность составляет более 170%. Предположительно использование уравнения (1.19) для определения значения коэффициента  $n_{cp}$  приводит к большому отклонению расчетной силы от измеренной при прокатке тонких алюминиевых полос. Многие работы показали, что при прокатке с использованием смазки будет уменьшаться коэффициент контактного трения. Коэффициент контактного трения при холодной прокатке в зависимости от смазки валков и меняется в широких пределах ( $\mu = 0,04 \div 0,1$ ) [44]. Уменьшение коэффициента трения приведет к уменьшению показателя  $\delta$ , что увеличивает значение коэффициента  $n_{cp}$ . Кроме того, из-за влияния толщины полосы ( $h_0 \geq 3\text{мм}$ ) также происходит увеличение значения коэффициента  $n_{cp}$ . Таким образом, в этом случае применение формулы (1.19) недостаточно надежно для определения давления и силы прокатки. Поэтому при прокатке тонких полос использовать целесообразно другое уравнение для определения  $n_{cp}$ .

Средний коэффициент напряженного состояния, полученный М. Д Стоуным методом тонких сечений, определяют по формуле (1.20) [44]:

$$n_{cp} = \frac{h_{cp}}{\mu \cdot l_D} \left[ e^{\frac{\mu \cdot l_D}{h_{cp}}} - 1 \right],$$

Предварительно по формуле (1.20) определим коэффициент  $n_{cp}$

$$n_{cp} = \frac{h_{cp}}{\mu \cdot l_D} \left[ e^{\frac{\mu \cdot l_D}{h_{cp}}} - 1 \right] = \frac{2,71}{0,075 \cdot 6,89} \left[ e^{\frac{0,075 \cdot 6,89}{2,71}} - 1 \right] \approx 1,102$$

Заметим, что расчет  $n_{cp}$  по формуле (1.21) Э. Зибеля [65], дает, при тех же данных, похожее значение этой величина:  $n_{cp}=1,086$ .

Выполним расчет давления и силы прокатки в средней 2 (с) основной зоне полосы с примененным уравнения (1.20) для определения  $n_{cp}$ . В установившемся периоде прокатки среднее давление определяем по формуле (3.3) с учетом вычисленных значений коэффициентов  $n_{cp}$ ,  $n_b$  и  $n_\sigma$ .

По формуле (3.3) получим величину среднего давления с применением уравнения (1.20) М. Д Стоуна для расчета  $n_{cp}$  в установившийся период прокатки:

$$p_{cp2} = 1,15\sigma_{ср} n_{cp} (n_\sigma n_b)^{0,5} = 1,15 \cdot 118,19 \cdot 1,102 \cdot (1,60 \cdot 1,23)^{0,5} = 209,78 \text{ Н/мм}^2$$

Вычислим силу прокатки по уравнению (1.13) с учетом  $p_{cp2}$

$$P_{расч2} = p_{cp2} \cdot F_k = 209,78 \cdot 176,28 \cdot 10^{-3} = 36,98 \text{ кН}$$

Расчетная сила прокатки  $P_{расч2} = 36,98$  кН с использованием формулы (3.3), учитывающей влияние основных факторов, влияющих на давление металла на валки с погрешностью 1,59%, соответствует измеренному значению силы  $P_{э2} = 37,58$  кН.

$$\Delta P_2 = \frac{P_э - P_{расч2}}{P_э} 100\% = \frac{37,58 - 36,98}{37,58} 100\% = 1,59\%$$

Проведен расчет давления и силы прокатки в начале (н) и конце (к) прокатки полосы в зонах 1 и 3 соответственно. На входных и выходных участках, равных длине дуги захвата (выхода) металла валками, предположим, что в этих зонах давление и сила прокатки зависят практически от величины среднего значения сопротивления металла деформации (среднего фактического предела текучести) с учетом коэффициента Лоде, а также коэффициента контактного трения. Предложено при прокатке концевых участков влияние условий контактного трения учитывать коэффициентом  $m$ , который рассчитывается по формуле:  $m = 0,85 + \mu$ . Поэтому среднее давление металла на валки на концевых участках прокатываемой тонкой полосы вычисляем по уравнению:

$$p_{cp(n)(\kappa)} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot m, \quad (3.6)$$

или

$$p_{cp(n)(\kappa)} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot (0,85 + \mu), \quad (3.7)$$

Тогда величины среднего давления металла на валки при прокатке с обжатием 20% концевых участков полосы из алюминиевого сплава АД33 будут равны величине:

$$p_{cp(n)} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot m = 1,15 \cdot 118,55 \cdot (0,85 + 0,075) = 126,11 \text{ Н/мм}^2$$

$$p_{cp(\kappa)} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot m = 1,15 \cdot 118,86 \cdot (0,85 + 0,075) = 126,44 \text{ Н/мм}^2$$

Определим с учетом  $p_{cp(n)}$  и условий деформации ( $\varepsilon \approx 20\%$ ) алюминиевой полосы и прокатки со смазкой И40 (5%), которая не учитывается этим уравнением, силу прокатки при полном начальном захвате металла валками:

$$P_{расч(n)} = p_{cp(n)} \cdot F_k = 126,11 \cdot 181,48 \cdot 10^{-3} = 22,89 \text{ кН}$$

Экспериментальная сила при прокатке начала (1) полосы  $P_{\text{э}1} = 24,24$  (кН) (см. табл. 3.1, рис. 3.8). Погрешность расчета  $\Delta P_1$  составляет 5,59%.

Рассчитанная с использованием формулы (3.7) сила  $P_{расч(n)} = 22,89$  кН при сравнении с измеренным распределением сил, по величине находится приблизительно посередине неустановившегося участка прокатываемой полосы (см. рис. 3.8).

Вычислим с учетом  $p_{cp(\kappa)}$  силу прокатки полосы на выходе из валков:

$$P_{расч(\kappa)} = p_{cp(\kappa)} \cdot F_k = 126,44 \cdot 184,45 \cdot 10^{-3} = 23,32 \text{ кН}$$

При сравнении рассчитанной  $P_{расч(\kappa)}$  с экспериментальной силой при прокатке конца (3) полосы, равной  $P_{\text{э}3} = 23,31$  кН (см. табл. 3.1, рис. 3.9) погрешность расчета составляет -0,05%.

Результаты расчетов силовых показателей прокатки полос из алюминиевых сплавов с различными смазочными материалами приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты расчетов показателей прокатки подлине полос из алюминиевых сплавов с различными технологическими смазками

Сплав	Смазка, $\mu$	Место	$\varepsilon$ , %	$P_3$ , кН	$P_{сч}$ , кН	$\Delta P$ , %
АД33	Без смазки, 0,095	1 (Н)	22,19	23,68	22,90	3,31
		2 (С)	21,38	42,86	37,38	12,79
		3 (К)	22,85	23,28	23,38	-0,42
	СПЗ (6%), 0,08	1 (Н)	22,77	24,14	22,86	5,29
		2 (С)	21,85	39,65	36,78	7,25
		3 (К)	23,10	24,01	23,08	3,86
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	22,70	24,24	22,89	5,59
		2 (С)	22,04	37,58	36,98	1,59
		3 (К)	23,28	23,31	23,32	-0,05
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	22,44	24,71	22,63	8,42
		2 (С)	22,11	37,57	36,89	1,81
		3 (К)	23,51	23,4	23,11	1,22
	Под.Масло, (5%) 0,074	1 (Н)	22,33	24,35	22,18	8,90
		2 (С)	22,11	37,57	36,80	2,06
		3 (К)	23,51	23,45	23,18	1,15
	Керосин 0,071	1 (Н)	22,50	19,01	18,23	4,11
		2 (С)	22,00	35,99	32,25	10,39
		3 (К)	23,00	20,79	18,67	10,21
	Керосин 0,071	1(Н)	33,00	23,37	23,02	1,52
		2(С)	31,50	47,08	42,31	10,13
		3(К)	33,50	24,73	23,64	4,40
	Керосин 0,071	1(Н)	48,00	29,80	28,88	3,10
		2(С)	46,50	60,64	56,65	6,58
		3(К)	49,00	31,21	29,98	3,94
Керосин 0,071	1(Н)	52,00	33,26	30,80	7,40	
	2(С)	50,50	63,69	60,65	4,77	
	3(К)	52,50	33,20	31,19	6,06	

Сплав	Смазка, $\mu$	Место	$\varepsilon$ , %	$P_z$ , кН	$P_{сч}$ , кН	$\Delta P$ , %
АМц	Без смазки, 0,095	1 (Н)	19,47	13,43	12,46	7,24
		2 (С)	18,42	22,05	19,72	10,55
		3 (К)	20,00	13,75	12,72	7,48
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	20,53	13,60	12,65	7,00
		2 (С)	20,00	20,86	20,48	1,83
		3 (К)	20,53	13,82	12,65	8,50
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	21,05	13,70	12,89	5,90
		2 (С)	20,00	20,16	20,45	-1,42
		3 (К)	20,53	13,95	12,74	8,70
	Керосин, 0,071	1 (Н)	21,58	13,75	12,93	5,98
		2 (С)	20,53	20,85	20,70	0,70
		3 (К)	21,58	14,05	13,04	7,16

Погрешность расчетных значений сил прокатки находится в пределах от – 0,42 до 12,79% и математическое ожидание  $M(\Delta P)$  равно 5,01% для АД33 и от – 1,42 до 10,55% и математическое ожидание  $M(\Delta P)$  равно 5,8% для АМц, что указывает на адекватность предлагаемых уравнений для определения сил прокатки по длине тонких алюминиевых полос и лент [106, 107].

### 3.3 Решение задачи снижения энергосиловых параметров прокатки с применением технологическим смазок

Одним из широко используемых способов снижения трения и, следовательно, уменьшения нагрузок на оборудование и потребления энергии является применение технологических смазок при холодной прокатке. Смазочные материалы используются в различных областях применения [126-128]. Также важно для высокой точности размеров и качества поверхности лент использовать смазки во время прокатки. Очевидно, что нанесение смазки влияет на крутящий момент на валках и, как следствие, снижает потребляемую, в связи с этим мощность. Это также очень эффективно для снижения энергопотребления в

металлургической промышленности, что может привести к снижению себестоимости производства проката [129] и загрязнению воздуха, которое выбрасывается в окружающую среду [130].

Расходуемая мощность, необходимая для деформации полос, реализуется в качестве крутящего момента на валках. Этот крутящий момент напрямую связан с трением между двумя поверхностями. Это означает, что мощность напрямую связана со значением трения между валками и полосой.

Необходимо вычислить момент и мощность прокатки, чтобы определить потребную мощность двигателя прокатного стана и оценить прочность деталей главной линии агрегата. После расчета момента прокатки и момента потерь для заданной скорости вращения валков, можно определить мощность прокатки на валу двигателя. Кроме того, для определения мощности необходимо учитывать КПД редуктора, шестеренной клетки и универсальных шпинделей.

Отсюда мощность привода, потребная для прокатки:

$$N_{\text{пр}} = M_{\text{в}} \cdot \omega = \frac{M_{\text{в}} \cdot V}{R}, \quad (3.8)$$

где  $M_{\text{в}}$  - крутящий момент, кН·м;  $\omega$  – угловая скорость валков, 1/с;  $V$  – скорость прокатки, м/с;  $R$  – радиус валков,  $R = 70,8 \cdot 10^{-3}$  м.

Величина  $M_{\text{в}}$  в формуле (3.8) определяется по формуле:

$$M_{\text{в}} = M_{\text{ПР}} + M_{\text{ТР}}, \quad (3.9)$$

где  $M_{\text{ПР}}$  - момент прокатки, кН·м;

$M_{\text{ТР}}$  - момент сил трения, возникающих в подшипниках. кН·м.

Одним из многих различных методов, используемых для определения момента прокатки, является вычисление через плечо приложения равнодействующего. При этом полный момент пластической деформации, действующий на двух валках, определяется по формуле:

$$M_{\text{ПР}} = 2 \cdot P_{\text{ПР}} \cdot \psi \cdot l_{\text{д}}, \quad (3.10)$$

где  $P_{\text{ПР}}$  – значение суммарной силы прокатки, кН;  $\psi$  - коэффициент плеча

приложения равнодействующего, обычно  $\psi \approx 0,35-0,45$  при холодной прокатке;  $l_d$  - длина очага деформации, мм;

Момент сил трения  $M_{TP}$  при прокатке на двухвалковом стане определяется по формуле:

$$M_{TP} = P_{ПР} \cdot \mu_n \cdot d_n, \quad (3.11)$$

где  $P_{ПР}$  – значение суммарной силы прокатки, кН;  $\mu_n$  - коэффициент трения в подшипниках рабочих валков, подшипники валков жидкостного трения, тогда  $\mu_n = 0,005$ ;  $d_n$  - диаметр шейки рабочих валков, мм;

Результаты исследования условия контактного трения на момент и мощность прокатки приведены в таблице 3.3. В таблице:  $P_0$  – максимальная сила прокатки, кН;  $M_{тр}$  – момент трения в подшипниках валков, кНм;  $M_{пр}$  – момент прокатки, кНм;  $M_в$  – крутящий момент, кНм;  $N_{пр}$  – мощность прокатки, кВт.

Таблица 3.3 - Влияние технологических смазок на энергосиловые параметры при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц на двухвалковом стане 150x235

	Смазка валков	$\varepsilon$ , %	$P_0$ , кН	$M_{пр}$ , кНм	$M_{тр}$ , кНм	$M_в$ , кН·м	$N_{пр}$ , кВт
АД33	Без смазки	21,38	42,86	0,2617	0,0171	0,279	1,101
	СПЗ (6%)	21,85	39,65	0,2439	0,0159	0,260	1,016
	И40 (5%)	22,04	37,58	0,2329	0,0150	0,248	0,935
	Пальмовое	22,11	37,57	0,2329	0,0150	0,248	0,960
	Под. Масло (5%)	22,11	37,57	0,2329	0,0150	0,248	0,944
	Керосин	22,00	35,99	0,1808	0,0144	0,195	0,751
АМц	Без смазки	18,42	22,05	0,0988	0,0088	0,108	0,452
	И40 (5%)	20,00	20,86	0,0974	0,0083	0,106	0,425
	Пальмовое	20,00	20,16	0,0941	0,0081	0,102	0,391
	Керосин	20,53	20,85	0,0986	0,0083	0,107	0,404

На основании результатов вычислений (табл. 3.3) построены графики влияния технологических смазок на потребляемой мощности и суммарный момент прокатки (рис. 3.11-3.12)

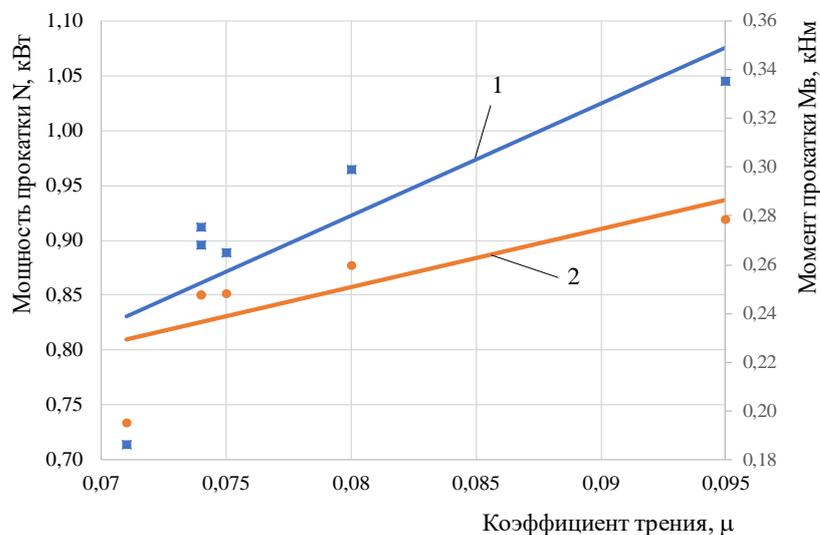


Рисунок 3.11 – Влияние коэффициента контактного трения на расчетную мощность и момент прокатки при холодной деформации ~20% тонких полос из алюминиевого сплава АД33 на лабораторном двухвалковом стане 150x235.

1 – момент прокатки; 2 – мощность прокатки.

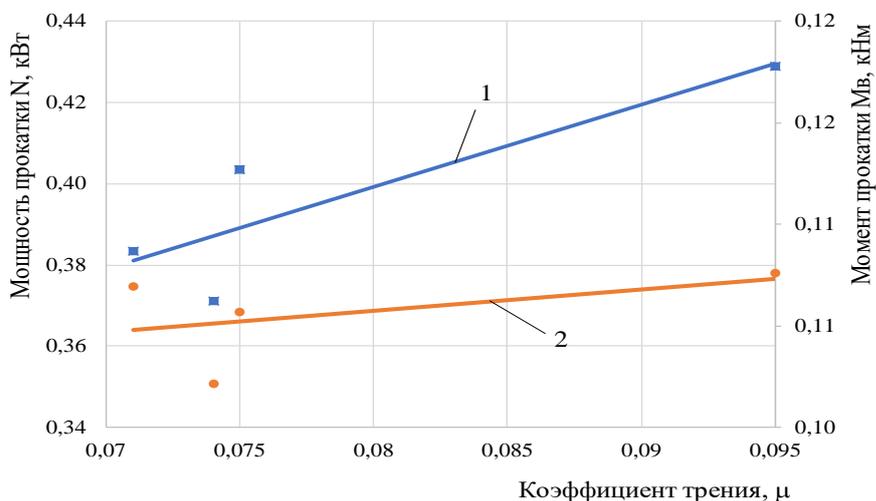


Рисунок 3.12 – Влияние коэффициента контактного трения на расчетную мощность и момент прокатки при холодной деформации ~20% тонких полос из алюминиевого сплава АМц на лабораторном двухвалковом стане 150x235.

1 – момент прокатки; 2 – мощность прокатки.

Установлено, что при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов с

применением технологических смазок уменьшаются суммарный момент прокатки и потребляемая мощность. При прокатке полос из сплава АД33 момент и мощность прокатки уменьшаются на 0,084 кНм (30,0%) и 0,332 кВт (31,7%) при смазке валков керосином и уменьшаются на 0,005 кНм (5,1%) и 0,058 кВт (13,5%) при смазке валков пальмовом маслом для сплава АМц по сравнению со сухими валками. Наиболее эффективными являются пальмовое масло, керосин и индустриальное масло И40.

Проверенная адекватность моделей позволяет рекомендовать блок-схему алгоритма расчета давления и сил прокатки по длине тонких полос и лент из алюминиевых деформируемых сплавов, которая приведена на рисунке 3.13.

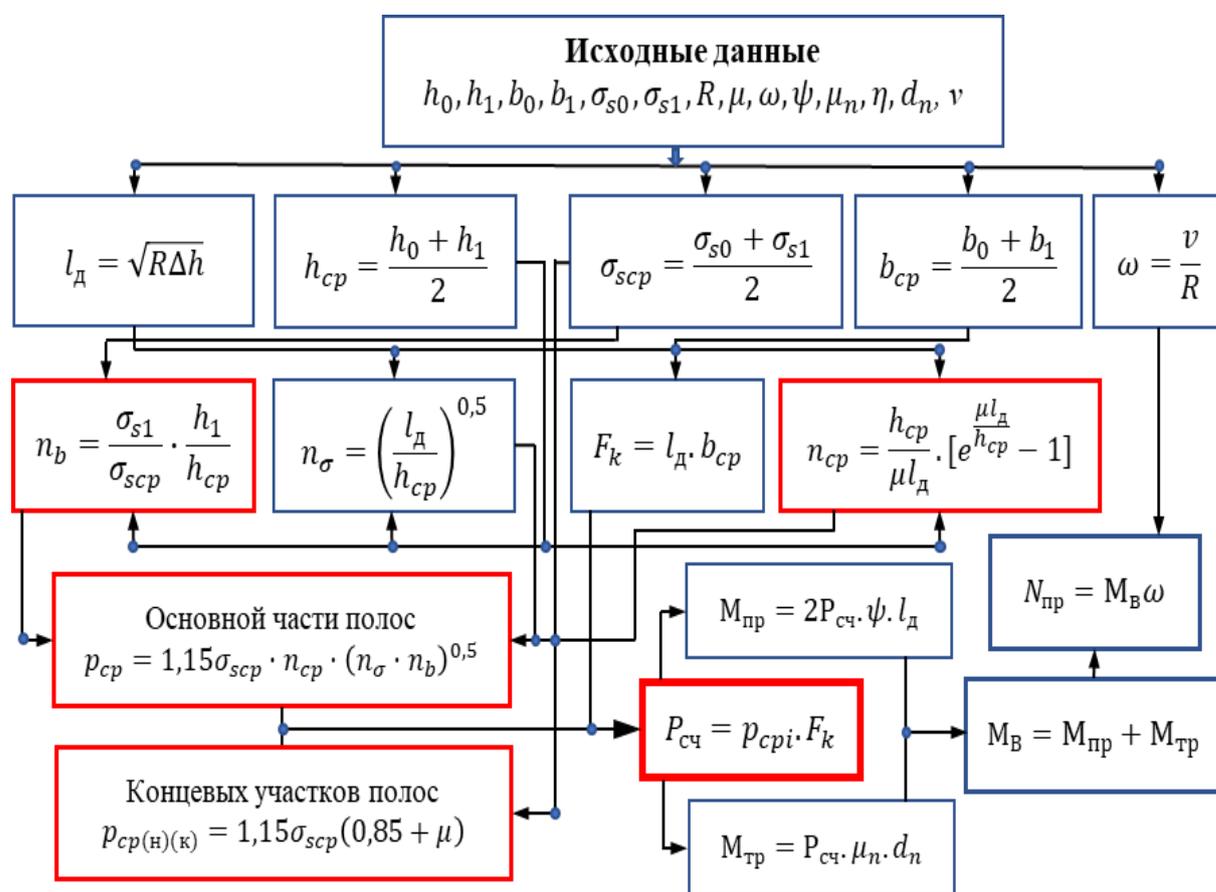


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритма расчета давления и энергосиловых показатели холодной прокатки по длине тонкой полосы с учетом коэффициента трения технологических смазок

### Выводы по главе 3

1. Установлены количественные закономерности влияния различных смазочных материалов валков на двухвалковом стане 150x235 на деформационно-силовые показатели холодной прокатки и толщину по длине тонких полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц. Показано, что применение технологических смазок при прокатке полос из сплавов АД33 и АМц эффективнее, по сравнению с прокаткой в сухих валках, влияет на уменьшение сил прокатки, увеличивается величина относительного обжатия, повышается равномерность толщины по длине полос. Поэтому изменение условий контактного трения необходимо учитывать при настройке стана на прокатку полос заданной толщины. Применение результатов лабораторных прокаток позволит обоснованно использовать смазки при проектировании рациональных режимов прокатки полос, листов и лент из алюминиевых сплавов на промышленных станах и в первую очередь на стане 175x300 завода в г.Донг Най (Вьетнам).

2. Результаты исследования подтвердили известные положения об уменьшении толщины полос на концевых участках по сравнению с серединой полосы. Установлено, что продольная разнотолщинность полос изменяется в широких пределах 0,01...0,06 мм в зависимости от деформационных условий прокатки и применяемых смазочных материалов. Показано, что применение смазывания валков позволяет в 1,6-2,0 раза уменьшать продольную разнотолщинность полос.

3. Впервые установлено, что при прокатке со смазками разница между деформационными и силовыми показателями в среднем и концевом участках при прокатке алюминиевых полос со смазками меньше, чем при прокатке полос в сухих валках. Разница степени деформации концевых участков и средней части полос АД33 уменьшается от 3,62% и 6,42% при прокатке в сухих валках до 1,47% и 4,35% при прокатке со смазками на передней и задней части соответственно. В случае прокатки полос АМц такие же результаты получены: от 5,41% и 7,89% при прокатке в сухих валках до 2,56% и 2,56% при прокатке со смазками на передней и задней части соответственно. Неравномерность распределения сил прокатки

уменьшается с 19,18 кН (44,8%) на переднем и 19,58 кН (45,7%) на заднем участке при прокатке в сухих валках до 12,86 кН (34,2%) и 14,17 кН (37,7%) соответственно при прокатке полос АД33 со смазками и уменьшается от 8,62 кН (39,1%) на переднем и 8,3 кН (37,6%) на заднем участке при прокатке в сухих валках до 6,46 кН (32,0%) и 6,21 кН (30,8%) соответственно при прокатке полос из сплава АМц со смазками.

4. По сравнению с деформацией в сухих валках, сила при прокатке со смазками на переднем и заднем участке больше, чем при прокатке без смазки, разница составляет  $0,17 \div 1,03$  кН и  $0,03 \div 0,73$  кН соответственно для сплава АД33 и составляет  $0,17 \div 0,32$  кН и  $0,07 \div 0,3$  кН соответственно для сплава АМц. А в середине полос разница сил прокатки ниже на  $3,21 \div 6,87$  кН для сплава АД33 и  $1,19 \div 1,89$  для АМц. Относительное обжатие в средней и концевых участках полос при прокатке со смазками больше, чем при прокатке в сухих валках соответственно на  $0,66 \div 2,57\%$ ;  $2,16 \div 3,3\%$  и  $0,66 \div 2,82\%$  для сплава АД33; на  $5,13\% \div 9,76\%$ ;  $7,89\% \div 10,26\%$  и  $2,56\% \div 7,35\%$  для сплава АМц. Экспериментальным путем установлена существенная неравномерность распределения силы прокатки по длине алюминиевых полос без применения технологических смазок. В установившемся периоде прокатки величина усилия прокатки в среднем в 1,5 раза больше, чем на концевых участках полосы.

5. Экспериментально подтверждена применимость предложенных математических моделей для расчета давления и силы прокатки по длине полосы на стационарных и неустановившихся участках. Показано, что применение формулы М.Д Стоуна при расчете среднего коэффициента  $n_{cp}$  - напряженного сжатия полосы и уточненного уравнения для расчета коэффициента  $n_b$  - влияния внешних частей полосы на очаг деформации позволяет, с математическим ожиданием погрешности 5,01% (АД33) и 5,8% (АМц), повысить точность определения сил в установившейся период (основной) прокатки тонких полос из алюминиевого сплава. Разработана блок-схема алгоритма расчета давления и силы прокатки, учитывающая влияние внеконтактных и внешних частей полосы в установившейся период деформирования, а также определение

силовых показателей на концевых участках полосы с учетом коэффициента контактного трения.

6. Результаты исследования могут использоваться при рациональном применении технологических смазок для совершенствования технологического процесса холодной прокатки алюминиевых лент, листов и полос, а также проектирования и контроля силовых показателей процесс по длине раската на листовых станах металлургических и машиностроительных предприятием и в первом очередь на стане 175x300 завода в г.Донг Най (Вьетнам).

## **ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД33 В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО СТАНА 175x300**

### **4.1 Компьютерное моделирование процесса прокатки лент из алюминиевого сплава АД33**

Теоретическое исследование процессов обработки металлов давлением во многих случаях можно проводить с помощью численных методов, особенно методом конечных элементов (МКЭ). В настоящее время для их реализации существует много компьютеризированных программ. Однако возможности этих программ существенно различаются, что необходимо учитывать, выбирая подход к решению конкретных задач при прокатке сплавов.

Компьютерное моделирование процессов прокатки связано с необходимостью исследования и расчетов процесса формоизменения металла и энергосиловых параметров с учетом характеристик оборудования и реологии проката. Моделирование холодной листовой прокатки, дает возможность не только сократить время подготовки производства, но и провести сравнение полученных вариантов расчета с точки зрения производительности и экономии энергетических затрат для технологических процессов, включающих большое количество обжатий при деформации металла [131-132].

Компьютерное исследование по влиянию технологических смазок на энергосиловые показатели при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава и механических свойств проводили применительно к промышленному двухвалковому стану 175x300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам) при изготовлении алюминиевых заготовок для листовой штамповки.

В качестве исходных данных для расчетов использовалась следующая информация: техническая характеристика стана; параметры, характеризующие свойства ленты; геометрические размеры лент (длина, толщина, ширина); экспериментально полученные данные по сопротивлению деформации для

используемого в расчетах материала; начальная и конечная температура прокатки; марка прокатываемого материала.

Принципиальная блок-схема компьютерного моделирования процесса холодной прокатки показана на рисунке 4.1.

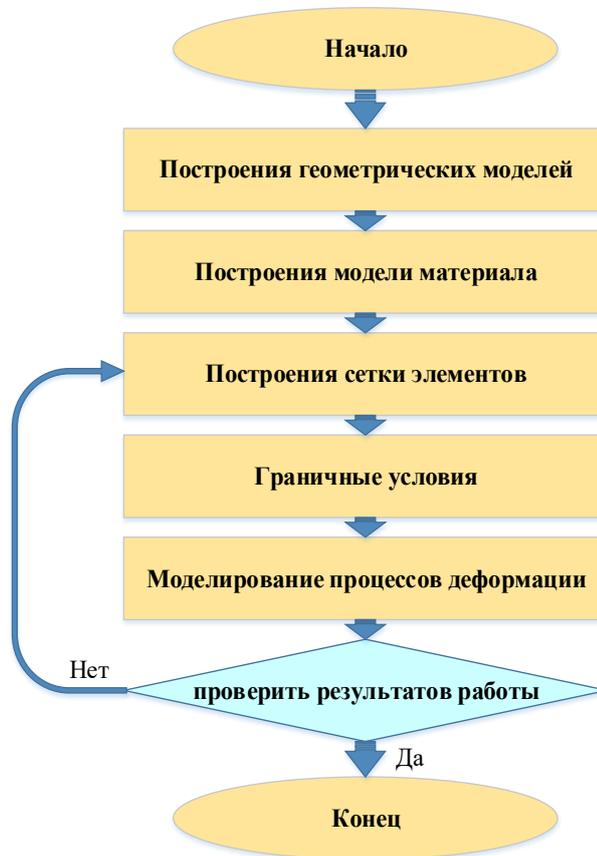


Рисунок 4.1 – Блок-схема для моделирования процесса прокатки

### *Построение 3D-модель процесса прокатки и модели материала в программе Qform-3D*

**QFORM** — это профессиональное инженерное программное обеспечение, используемое для моделирования, анализа и оптимизации процессов обработки металлов давлением, обеспечивающее высокую надежность. Он охватывает основные потребности в моделировании обработки металлов давлением для крупных и малых производственных компаний, а также научно-исследовательских и образовательных учреждений. QForm позволяет моделировать процесс прокатки, требующий сложных теоретических расчетов для обоснования режимов деформации с целью уменьшения количества проходов,

надежного расчета энергосиловых параметров прокатного стана.

Геометрическая модель прокатки разработана программой Autodesk Inventor — программа для проектирования трехмерных механических твердотельных моделей, также для создания трехмерных цифровых прототипов. Коммуникаций при проектировании, создания инструментов и моделирования изделий.

3D-модель процесса прокатки лент соответствует параметрам прокатного стана 175x300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най (Вьетнам) (рис. 4.2).

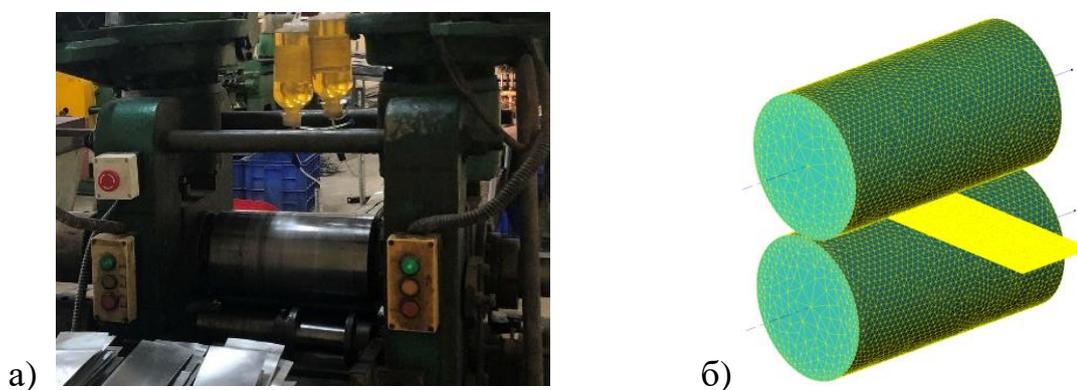


Рисунок 4.2 – Промышленный двухвалковый стан 175x300 (а) и его 3D модель (б)

Определение точных моделей материалов для моделирования очень важно и непосредственно влияет на результаты моделирования.

После создания и подготовки моделей в препроцессоре Qform 3D необходимо задать материал заготовки. Мы построили модель алюминиевого сплава АД33 со следующими данными:

- Химический состав алюминиевого сплава, который используется в моделировании представлены в таблице 2.1 [106, 107].

- Для моделирования процесса холодной прокатки листовой заготовки необходимо получить кривую напряжения- деформации материалов. В результате испытаний нами получены диаграммы напряжений при растяжении образцов из алюминиевого сплава АД33 [109, 110], которые характеризуют показатели механических свойств (рис. 4.3).

- Другие параметры материала: Плотность: 2705 [кг/м<sup>3</sup>]; Теплопроводность:

185 [Вт/мК]; Температурный коэф. линейного расширения:  $2,21 \cdot 10^{-5}$  [ $1/^\circ\text{C}$ ]; Теплоемкость: 898 [Дж/кгК]; Модуль Юнга: 57500 [МПа] и Коэффициент Пуассона: 0,33.

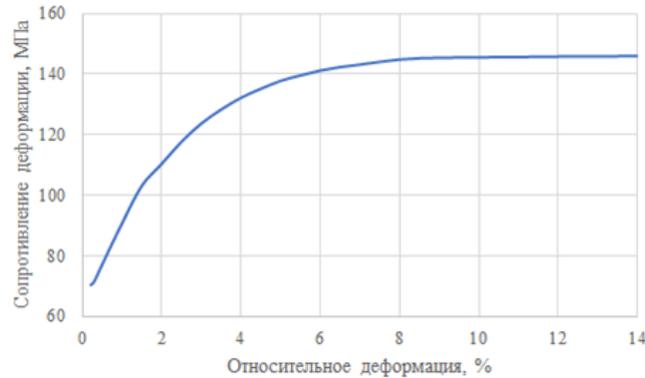


Рисунок 4.3 - Кривая зависимости между напряжениями и деформацией материалов из алюминиевого сплава АД33 [111]

#### 4.2 Влияние технологических смазок на энергосиловые показатели процесса прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 при моделировании

Исследовали влияние технологических смазок на распределение силы, момента и мощности прокатки по длине лент из алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке.

Исходные данные процесса прокатки и характеристики стана 175x300 представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Исходные данные для компьютерного моделирования процесса прокатки лент из алюминиевого сплава АД33

№	Параметр	Значение
1	Фактический диаметр валков, мм	167
2	Скорость прокатки, м/с	0,27
3	Зазор между валками $S$ , мм	0,55
4	Материал валков	T1 HRC62
5	Материал заготовки	АД33
6	Размер заготовка, мм	0,7x100x300

№	Параметр	Значение
7	Температура прокатки, °С	20
8	Коэффициент трения между валками и заготовкой	0,095; 0,08; 0,075; 0,074; 0,071

Основные результаты компьютерного моделирования процесса прокатки лент представлены на рисунках 4.4-4.6.

Расчет силовых и энергосиловых параметров выполнен в вычислительных средах конечно-элементного анализа по схеме процесса продольной прокатки. Данные компьютерного моделирования процесса прокатки полос из алюминиевого сплава АД33 с различными технологическими смазками представлены на рисунках 4.4-4.6 и в таблице 4.2. Результаты исследования компьютерным моделированием позволяют точно оценить влияние смазок валков на распределение сил и мощность по длине лент при холодной прокатке листовых заготовок из алюминия на промышленном двухвалковом стане 175x300. Эти результаты позволяют оптимизировать технологии процесса листовой прокатки по критерию минимума энергозатрат.

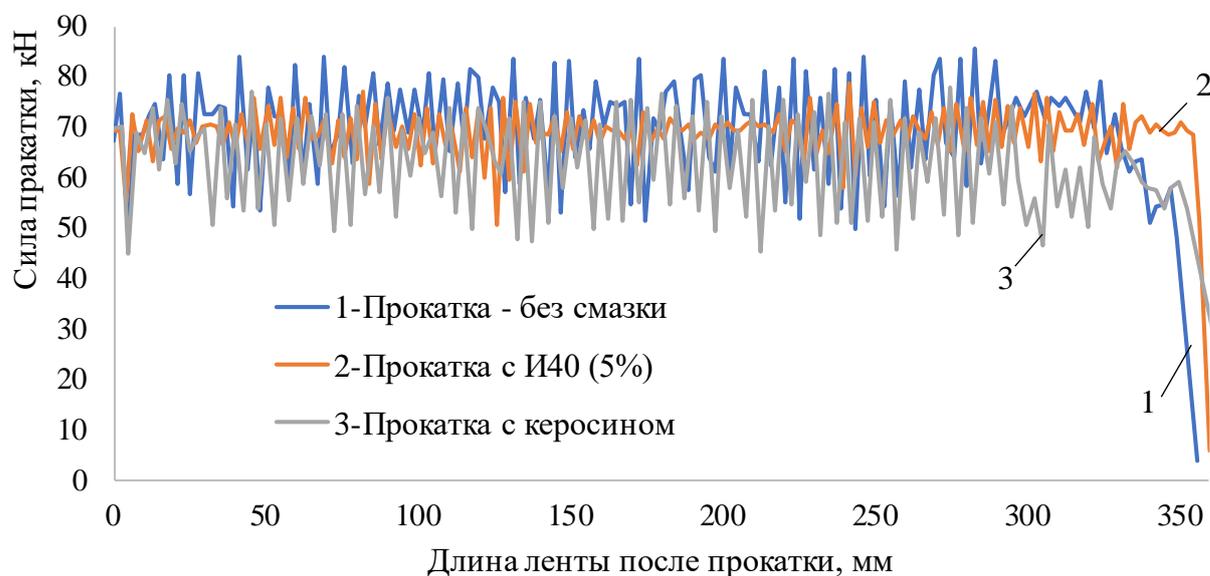


Рисунок 4.4 – Распределение сил по длине участка лент при моделировании прокатки с обжатием 20% из алюминиевого сплава АД33: 1 – в сухих валках; 2 – с индустриальным маслом И40 (5%) и 3 – с керосином.



Рисунок 4.5 – Распределение момента по длине участка лент при моделировании прокатки с обжатием 20% из алюминиевого сплава АД33:

1 – в сухих валках; 2 – с индустриальным маслом И40 (5%) и 3- с керосином.

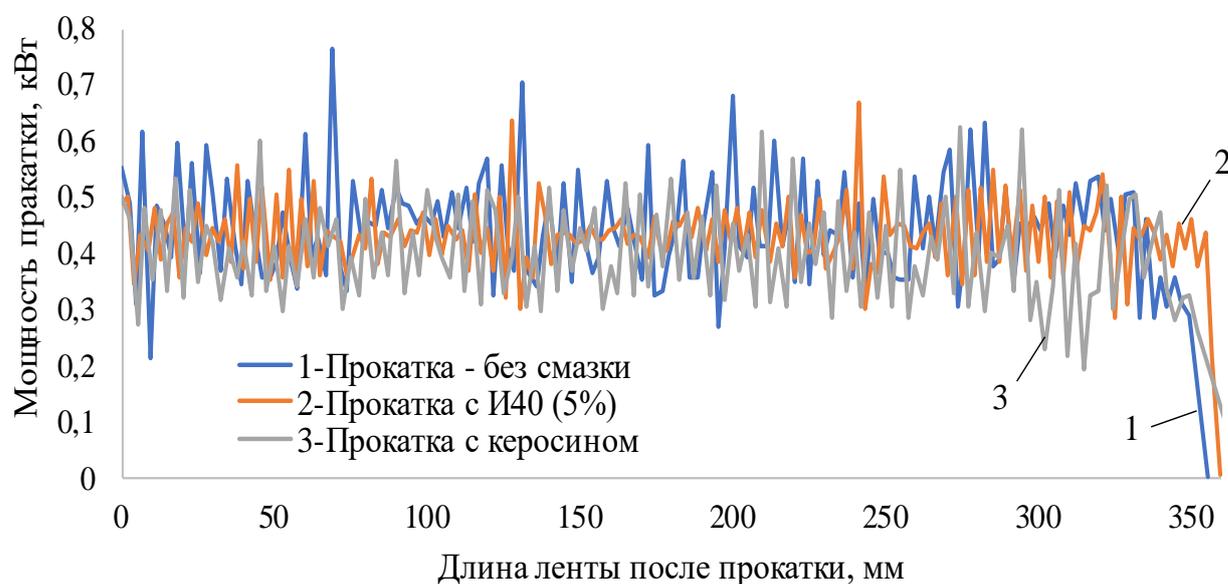


Рисунок 4.6 – Распределение мощности по длине участка лент при моделировании прокатки с обжатием 20% из алюминиевого сплава АД33:

1 – в сухих валках; 2 – с индустриальным маслом И40 (5%) и 3- с керосином.

В таблице 4.2 приведены параметры моделирования:  $P_{\text{мод}}$  — значение максимальной силы прокатки при моделировании;  $M_{\text{мод}}$  и  $N_{\text{мод}}$  — максимальный

момент и максимальная мощность прокатки при моделировании.

Таблица 4.2 – Влияние технологических смазок на максимальные силы, моменты и мощности при компьютерном моделировании процесса холодной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 на 3D модели стана 175x300

Технологические смазки; $\mu$	Показатели моделирования		
	$P_{\text{мод}}$ , кН	$M_{\text{мод}}$ , кНм	$N_{\text{мод}}$ , кВт
Сухие валки; 0,095	85,47	0,207	0,767
СПЗ (6%); 0,08	79,51	0,185	0,686
Индустриальное масло И40 (5%); 0,075	78,75	0,181	0,669
Пальмовое масло; 0,074	78,45	0,169	0,625
Керосин; 0,071	77,99	0,168	0,624

Компьютерным моделированием установлено, что максимальные значения сил, момента и мощности прокатки лент АД33 с большим запасом не превышают допустимые величины этих показателей на промышленном стане 175x300 во Вьетнаме.

Результаты моделирования показали, что при применении технологических смазок силовые и энергосиловые параметры снижаются, по сравнению с деформацией в сухих валках. При моделировании процесса прокатки лент из сплава АД33 с технологической смазкой И40 (5%) по сравнению с прокатной в сухих валках сила прокатки уменьшается на 6,72 кН (7,9%), момент прокатки на 0,026 кНм (12,6%) и мощность прокатки на 0,098 кВт (12,8%). Результаты прокаток на лабораторном стане и компьютерного моделирования с технологическими смазками могут быть использованы при разработке рациональных технологических режимов прокатки полос и лент на промышленных станах.

#### **Выводы по главе 4**

1. Результаты компьютерного моделирования процесса прокатки лент толщиной 0,55мм, шириной 100мм из сплава АД33 с разными условиями

контактного трения на промышленном двухвалковом стане 175x300 позволили количественно оценить влияние технологических смазок на распределение неконтролируемых переменных: сил, момента и мощности прокатки по длине лент.

2. Результаты моделирования показали, что при применении технологических смазок силовые и энергосиловые параметры снижаются, по сравнению с деформацией в сухих валках. При моделировании процесса прокатки лент из сплава АД33 с технологической смазкой И40 (5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках сила прокатки уменьшается на 6,72 кН (7,9%), момент прокатки на 0,026 кНм (12,6%) и мощность прокатки на 0,098 кВт (12,8%). При моделировании прокатки лент с технологической смазкой керосин сила прокатки уменьшается на 8,8%, момент на 18,8% и мощность прокатки на 18,6% по сравнению с прокаткой в сухих валках.

3. Результаты прокаток на лабораторном стане и компьютерного моделирования с технологическими смазками могут быть использованы при разработке рациональных технологических режимов прокатки полос и лент из сплава АД33 на промышленных станах, включая стан 175x300 машиностроительного завода во Вьетнаме.

## ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА АД33 НА ПРОМЫШЛЕННОМ ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ 175x300

### 5.1. Анализ технологии прокатки, характеристик стана 175x300 и требований к качеству лент

На металлургических и машиностроительных заводах при изготовлении алюминиевых заготовок для листовой штамповки используется технология холодной прокатки полос и лент [29, 133-135].

Холодная прокатка тонких лент из алюминиевых сплавов в том числе сплава АД33 проводится на двухвалковом стане 175x300 (Рис. 5.1) машиностроительного завода во Вьетнаме. После прокатки и отжига лент заготовки поступают на вертикальный пресс для листовой штамповки деталей. К ленточным заготовкам предъявляются высокие требования по точности. Однако прокатный стан не оснащен системой контроля сил прокатки и регулирования толщины, что затрудняет рациональное проектирование и реализацию режимов деформирования точных лент.



Рисунок 5. 1 - Промышленный двухвалковый стан 175x300

На двухвалковом стане 175x300 для прокатки лент толщиной 0,55мм используют заготовки толщиной 0,7мм, вырезанные из рулона. К алюминиевой

ленте для листовой штамповки деталей предъявляют высокие требования по толщине и механическим свойствам. Отклонение по толщине не должно превышать  $\pm 0,01$  мм.

Исходным материалом (подкатом) для прокатки и исследования послужили ленты размером 0,7x100x2000 мм (рис. 5.2), полученные после продольной и поперечной резки промышленных рулонных лент из алюминиевого сплава АД33 на машиностроительном заводе в городе Донг Най. Проведение термообработки прокатных из алюминия заготовок осуществляли для получения мягкого состояния, которое является наиболее благоприятным для дальнейшей пластической деформации. Для этого после прокатки проводили отжиг алюминиевых лент. Отжиг лент провели при температуре около  $410^{\circ}\text{C}$  в течении 1 часа. После проводили медленное охлаждение металла в печи со скоростью около  $28^{\circ}\text{C}/\text{час}$  до температуры  $260^{\circ}\text{C}$ , затем охлаждение на воздухе до температуры около  $20^{\circ}\text{C}$  [42, 105].

Опытные прокатки лент проводили на промышленном двухвалковом стане 175x300 (см. рис.5.1). Основные характеристики стана 175x300: мощность привода 45кВт, фактический диаметр валков 167мм, скорость прокатки 0,04-0,43м/с, толщина подката  $\leq 2,5$ мм, толщина готовой ленты  $\geq 0,3$ мм, максимальное усилие прокатки 450кН. Химический состав сплава и основные механические свойства лент из алюминиевого сплава АД33 приведены в диссертации и опубликованы в работах [106, 107].

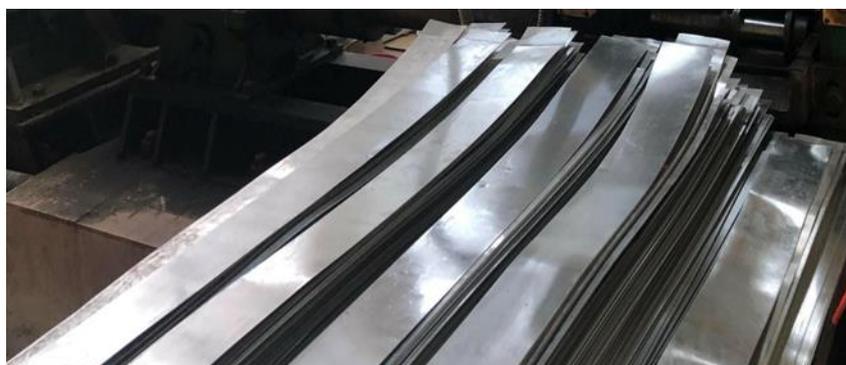


Рисунок 5.2 - Ленты размерами 0,7x100x2000мм из алюминиевого сплава АД33 на машиностроительном заводе в городе Донг Най (Вьетнам)

При варьировании контактного трения путем подачи на валки различных смазочных материалов. После прокатки измерили толщину готовых лент по длине. Результаты измерения позволяют оценить качества лент по точности по сравнению с требованиями листовой заготовки для штамповки деталей. Толщина по длине лент после прокатки должно находиться в диапазоне  $0,55 \pm 0,01$  мм. Измерение толщины лент до и после прокатки проводили электронным штангенциркулем с погрешностью  $\pm 0,01$  мм, а длины с погрешностью  $\pm 0,1$  мм.

## **5.2. Исследование, проектирование и опробование рациональных режимов прокатки точных лент из алюминиевого сплава АД33 на промышленном двухвалковом стане 175x300 с технологическими смазками.**

На машиностроительном заводе в Донг Най (Вьетнам) процесс прокатки алюминиевых лент на двухвалковом стане 175x300 осуществляется при смазывании валков водой или мыльным водяным раствором, дозирование которого производится в соответствии с опытом инженеров и вальцовщиков. Поэтому исследование и применение новых смазочных материалов валков имеет актуальное значение для повышения эффективности производства и качества листового прокатка. Результаты лабораторных исследований на двухвалковом стане 150x235 [106, 107] и компьютерное моделирование позволили конкретизировать поиск рациональных режимов прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 с различными технологическими смазками на двухвалковом стане 175x300.

Проектирование и усовершенствование процесса холодной прокатки лент проводится с использованием математических моделей и технологических решений, направленных на повышение точности проката и снижение нагрузок на оборудование. Для проектирования и реализации рациональных режимов прокатки тонких лент из алюминиевого сплава АД33 на стане холодной прокатки 175x300 использованы регрессионные уравнения и математические модели, представленные в работах [42, 63, 76, 89, 106, 107, 123]. Однако подтверждение рациональных режимов может быть получено после проведения и анализа

опытных прокаток на промышленном стане.

Основные показатели механических свойств алюминиевых лент АД33 определяли при проведении испытаний образцов на растяжение по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [66]. В результате испытаний получены диаграмма растяжения образцов, характеризующая показатели основных механических свойств, а также усредненные результаты испытаний образцов на растяжение, которые приведены в таблице 5.1 и рисунке 5.3.

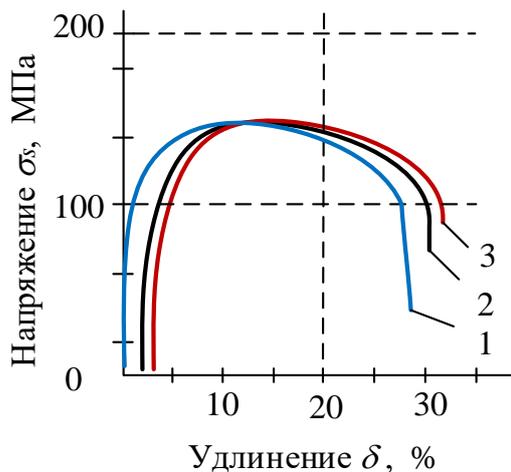


Рисунок 5.3 - Диаграмма напряжений при растяжении образцов из алюминиевого сплава АД33

Таблица 5.1 - Механические свойства отожженных (в мягком состоянии) лент из алюминиевого сплава АД33

№ п/п	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	70,5	146,5	27,60
2	71,5	148,0	29,30
3	71,0	147,5	28,40
Среднее	71,0	147,3	28,43

Опытную прокатку лент осуществляли на двухвалковом стане 175x300 с фактическим диаметром валков 167 мм и скоростью прокатки 0,27м/с. На стане 175x300 прокатали 30 опытных лент толщиной 0,55мм из алюминиевого сплава АД33 из подката размерами 0,7x100x2000 мм с разными условиями смазывания валков, в том числе 10 лент в сухих валках (без смазки), 10 лент при подаче воды на валки и 10 лент – с технологической смазкой индустриальным маслом И40 (5%). Расчет коэффициента контактного трения  $\mu$  проводили по формуле А. П. Грудева, представленной в работах [42, 50, 96]. Коэффициент трения определяли с учетом фактической кинематической вязкости смазки; максимальной высоты микронеровностей на поверхности бочки валка; окружной скорости бочки валков на стане 175x300 и коэффициента  $K_m$ , учитывающий влияние вида и состава

смазки. Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения по формуле А. П. Грудева для различных смазок при холодной прокатке лент из алюминиевого сплава на стане 175x300: со смазкой валков индустриальным маслом И40 (5%) -  $\mu = 0,075$ ; водой -  $\mu = 0,08$ . При холодной прокатке алюминия в сухих валках  $\mu = 0,095$  [40].

Процесс холодной прокатки алюминиевых лент выполнен по двум и трем проходам. Число проходов выбрали в зависимости от качества (точности и механических свойств) лент после прокатки. Разработанная технологическая схема прокатки лент из сплава АД33 на стане 175x300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам) приведена на рисунке 5.4.

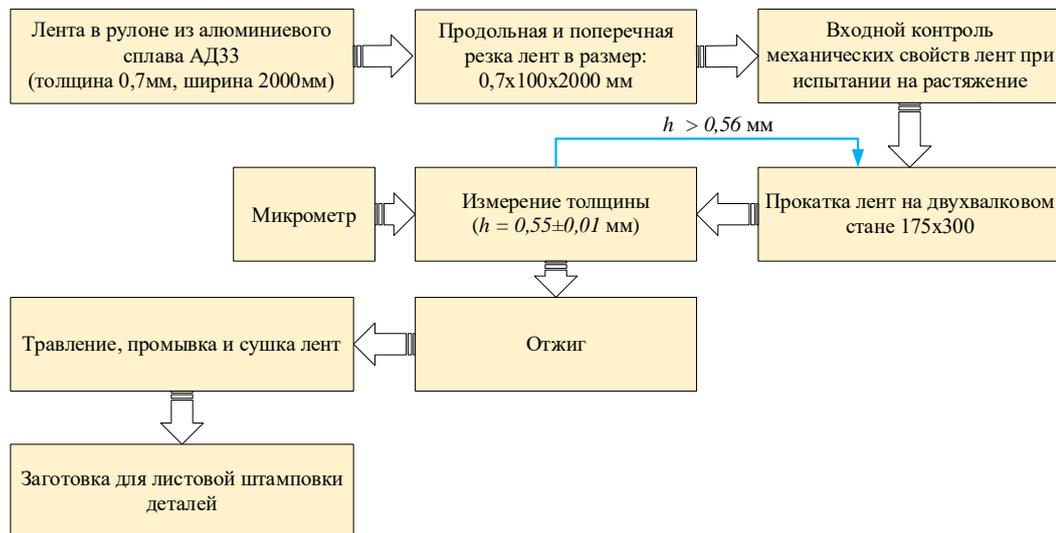


Рисунок 5.4 - Технологическая схема производства тонких лент из алюминиевого сплава АД33 на машиностроительном заводе г.Донг Най (Вьетнаме)

Основные результаты опытных прокаток на стане 175x300 и расчеты приведены в таблице 5.2, включая параметры и показатели процесса прокатки:  $h_0$ ,  $h_1$  – толщина лент до и после прокатки, мм;  $\varepsilon_{\Sigma} = (\sum_{i=1}^n \Delta h_i / h_0) \cdot 100$  – суммарное относительное обжатие, %;  $\sigma_{T0}$ ,  $\sigma_{T1}$  – предел текучести лент до и после прокатки;  $\sigma_{B1}$ , – предел прочности лент после прокатки;  $P$  – значение силы прокатки в начале (1), в середине (2) и в конце (3) длины каждой ленты, а также  $N$  – мощность прокатки. Приведенные в таблице 5.2 показатели механических свойств

лент, силы и мощности прокатки определяли по формулам, которые приведены в работах [44, 106-111, 125].

Таблица 5.2 - Влияние условий контактного трения на толщину, деформационные и энергосиловые показатели при холодной прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175x300.

Смазка μ	проход	Место	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>1</sub> , мм	ε <sub>Σ</sub> , %	σ <sub>т0</sub> , МПа	σ <sub>т1</sub> , МПа	σ <sub>в1</sub> , МПа	P, кН	N, кВт
Сухие валки, 0,095	1	1 (Н)	0,71	0,62	12,68	71,00	153,78	163,51	35,50	
		2 (С)	0,70	0,63	10,51	71,00	149,91	160,82	72,36	0,749
		3 (К)	0,70	0,61	12,86	71,00	154,09	163,73	35,55	
	2	1 (Н)	0,62	0,57	19,72	153,78	163,70	172,18	37,38	
		2 (С)	0,63	0,59	16,19	149,91	159,14	167,86	56,52	0,430
		3 (К)	0,61	0,56	20,00	154,09	164,04	172,53	37,45	
	3	1 (Н)	0,56	0,55	22,54	163,70	166,92	175,62	17,41	
		2 (С)	0,59	0,56	20,45	159,14	164,57	173,08	43,02	0,284
		3 (К)	0,56	0,55	21,43	164,04	165,69	174,27	17,36	
Вода, 0,08	1	1 (Н)	0,71	0,61	14,08	71,00	156,05	165,25	37,80	
		2 (С)	0,70	0,61	12,78	71,00	153,97	162,34	67,93	0,741
		3 (К)	0,70	0,60	14,29	71,00	156,36	164,20	37,85	
	2	1 (Н)	0,61	0,56	21,13	156,05	165,35	173,91	37,76	
		2 (С)	0,62	0,58	18,32	153,97	161,97	170,47	53,71	0,414
		3 (К)	0,60	0,55	21,43	156,36	165,69	174,27	37,84	
	3	1 (Н)	0,55	0,54	23,94	165,35	168,42	177,34	17,57	
		2 (С)	0,57	0,56	20,45	161,97	164,57	173,08	20,67	0,075
		3 (К)	0,55	0,54	22,86	165,69	167,27	176,02	17,53	
И40 (5%), 0,075	1	1 (Н)	0,70	0,60	14,29	71,00	156,36	165,50	37,85	
		2 (С)	0,70	0,61	12,86	71,00	154,09	163,73	66,36	0,724
		3 (К)	0,70	0,60	14,29	71,00	156,36	165,50	37,85	
	2	1 (Н)	0,60	0,55	21,14	156,36	165,37	157,67	37,22	
		2 (С)	0,61	0,56	20,00	154,09	164,04	156,96	53,56	0,413
		3 (К)	0,60	0,55	21,14	156,36	165,37	157,67	37,26	

На основании результатов исследований были построены графики влияния различных условий контактного трения на формирование толщины, деформационно-силовых и энергетических (мощность) показателей в процессе холодной прокатки по длине алюминиевых лент на промышленном стане 175х300 (рис. 5.5-5.9).

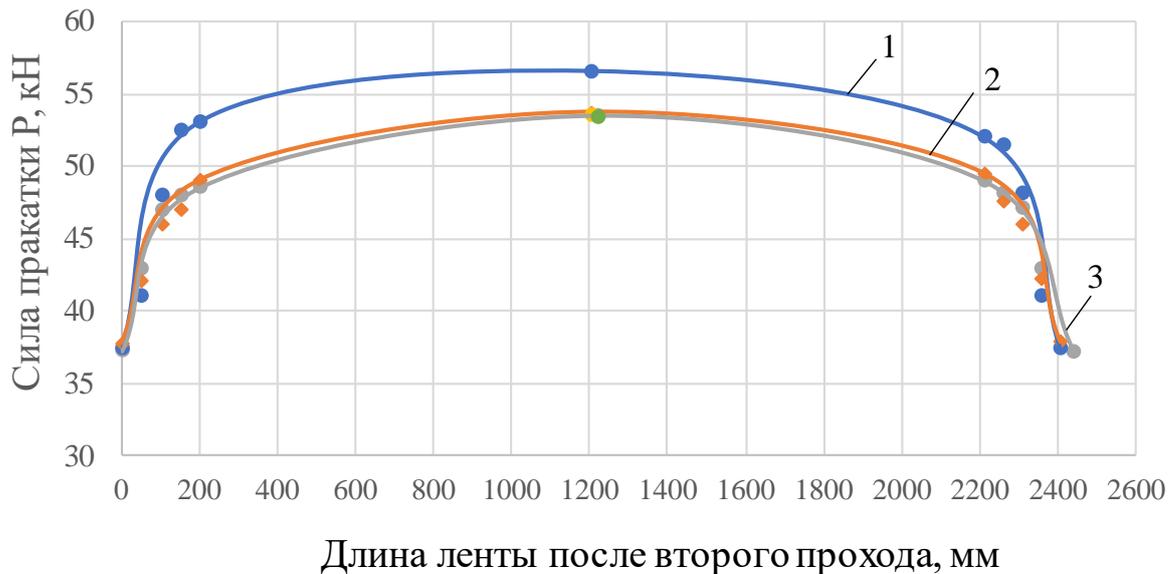


Рисунок 5.5 - Влияние технологических смазок на распределение силы прокатки по длине алюминиевой ленты при холодной прокатке во втором проходе на стане 175х300: 1– сухие валки; 2– вода; 3- индустриальное масло И40.

По результатам исследований, видно, что применение технологических смазок при холодной прокатке алюминиевых лент на стане 175х300 позволяет снизить силовые показатели прокатки [136]. В первом проходе максимальная сила прокатки уменьшается на 8,3% - с 72,36 кН до 66,36 кН при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках. В отличие от смазки водой сила падает на 2,31% - с 67,93 кН до 66,36 кН. Во втором проходе максимальная сила прокатки снижается на 5,24% - с 56,52 кН до 53,56 кН при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках. В процессе смазки водой сила уменьшается незначительно (на 0,28%, с 53,71 кН до 53,56 кН).

Неравномерность распределения сил прокатки по длине лент при применении смазки И40 понижается на 22,7% (в первом проходе) и на 14,64% (во втором походе) по сравнению с прокаткой в сухих валках.

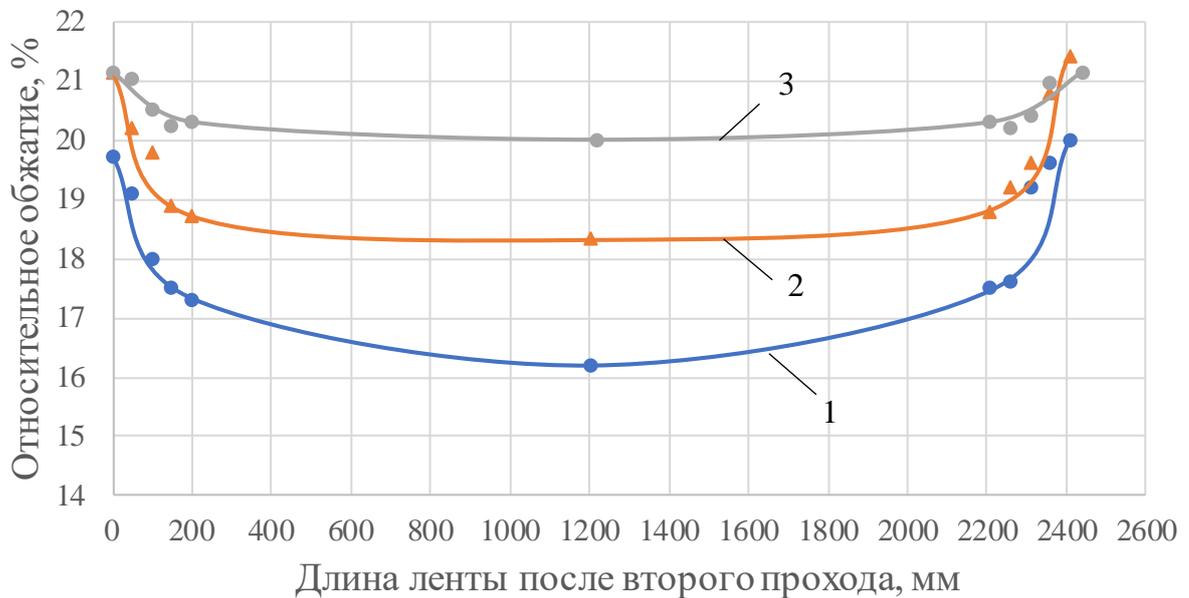


Рисунок 5.6 - Влияние технологических смазок на распределение относительных обжатий по длине алюминиевого ленты при холодной прокатке во втором проходе на стане 175х300: 1– сухие валки; 2– вода; 3- промышленное масло И40.

Степень деформации ленты при смазке валков промышленным маслом И40 (5%) больше, чем при прокатке в сухих валках на 2,29% (в первом проходе) и на 3,81% (во втором проходе). По сравнению со смазкой водой степень деформации ленты при использовании промышленного масла И40 (5%) увеличивается незначительно (на 0,62%) с 12,78% до 12,86% (в первом проходе) и на 1,68% (во втором проходе).

Неравномерность распределения степени деформации ( $\Delta\epsilon$ ) по длине лент при применении смазки И40 (5%) существенно уменьшается: на 39,15% (с 2,35% до 1,43%) в первом проходе и на 70,08% (с 3,81% до 1,14%) во втором походе по сравнению с прокаткой в сухих валках. В отличие от прокатки со смазкой водой неравномерность распределения степени деформации по длине ленты при смазке валков промышленным маслом И40 (5%) уменьшается на 4,6% (с 1,5% до 1,43%)

в первом проходе и на 63,22% (с 3,1% до 1,14%) во втором походе.

В процессе прокатки при отклонении толщины от номинала (0,55мм) по длине ленты формируется разнотолщинность. Продольная разнотолщинность отрицательно влияет не только на металлургический передел металла, но и на качество готовых изделий из проката. На рисунках 5.7, 5.8 приведены распределение толщины по длине и продольная разнотолщинность  $\delta h$  ленты после второго прохода при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 с разными условиями смазывания валков.

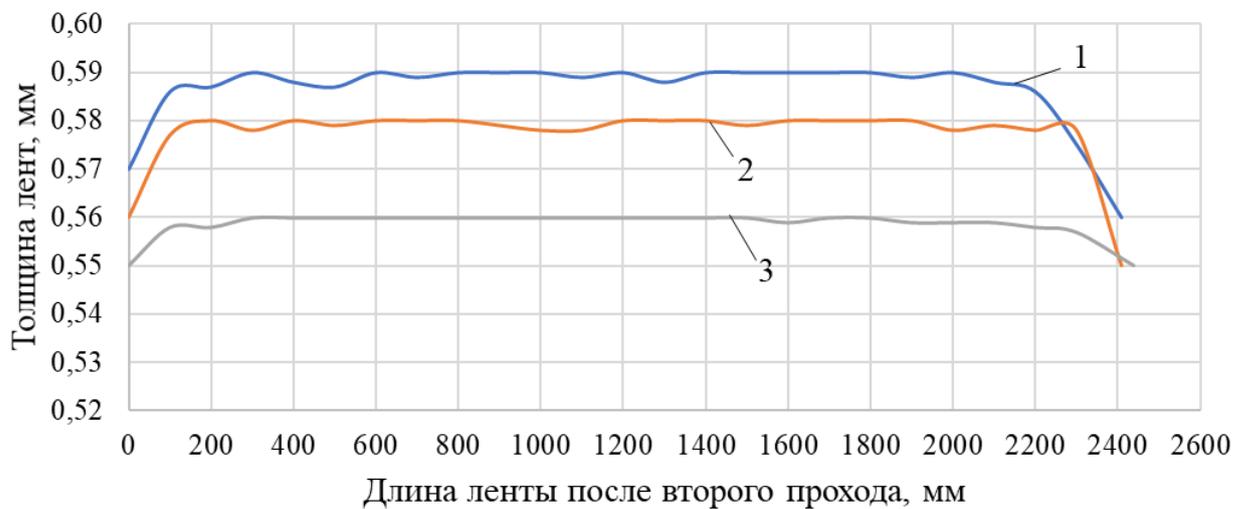


Рисунок 5.7 - Распределение толщины по длине лент из сплава АД33 после второго прохода при холодной прокатке на стане 175х300 с разными условиями смазывания валков: 1– сухие валки; 2– вода; 3- индустриальное масло И40

На рисунке 5.7 видно, что распределение толщины по длине алюминиевых лент после второго прохода при смазке валков маслом И40 (5%) более равномерно, чем в сухих валках или с водой. В основной части проката толщина (см. рис. 5.7, кривая 3) практически одинакова или с незначительным изменением, а продольная разнотолщинность  $\delta h$  ленты после второго прохода (рис. 5.8) наименьшая. Необходимо отметить, что толщина лент по всей длине после второго прохода прокатки со смазкой И40 (5%) находится в диапазоне 0,55 – 0,56 мм. Это соответствует техническим требованиям для листовой штамповки

деталей ( $h_1=0,55\pm 0,01$  мм) машиностроительного завода в г.Донг Най. При прокатке в сухих валках или с водой толщина по длине лент после второго прохода не обеспечивает требования по точности ( $h_1 > 0,56$  мм), поэтому в этом случае нужен третий проход. Таким образом, применение технологической смазки индустриальным маслом И40(5%) на стане 175x300 позволяет уменьшить число проходов прокатки лент с трех до двух и обеспечить требуемую точность толщины по всей длине ленты.

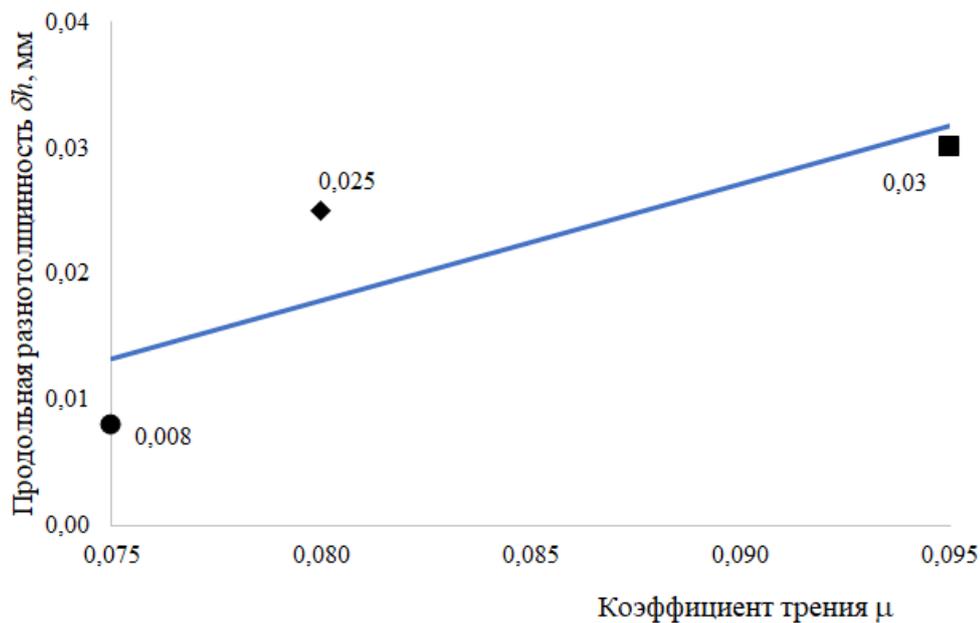


Рисунок 5.8 - Влияние условий контактного трения на продольную разнотолщинность  $\delta h$  лент после второго прохода при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175x300:

■ без смазки -  $\mu=0,095$ ; ◆ вода -  $\mu=0,08$  и ● И40(5%) -  $\mu = 0,075$ .

На рисунке 5.8 видно, что при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175x300 после второго прохода в сухих валках продольная разнотолщинность ленты  $\delta h = 0,03$  мм, при использовании воды  $\delta h = 0,025$  мм, а при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) -  $\delta h = 0,008$  мм. В связи с этим по сравнению со самыми большими продольными отклонениями по толщине ленты из алюминиевого сплава в сухих валках при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%)  $\delta h$  меньше на 73% при сухих валках и на 68%

при смазке валков водой.

На рисунке 5.9 показано влияние условий контактного трения на мощность прокатки лент.

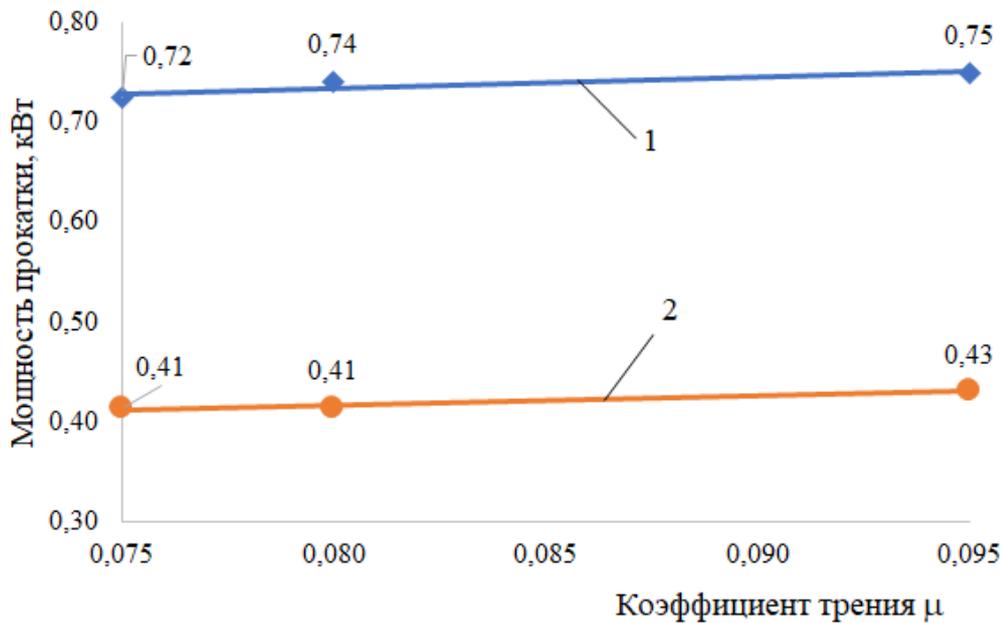


Рисунок 5.9 - Влияние условий контактного трения на мощность прокатки при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175x300:  
1- в первом проходе и 2- во втором проходе.

В первом проходе максимальная мощность прокатки при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) снижается на 3,34% - с 0,749 кВт до 0,724 кВт по сравнению с прокаткой в сухих валках. В отличие от прокатки со смазкой водой максимальная мощность прокатки при смазке валков маслом И40 (5%) уменьшается на 2,3% - с 0,741 кВт до 0,724 кВт. Во втором проходе максимальная мощность прокатки при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) снижается на 3,95% - с 0,43 кВт до 0,413 кВт по сравнению с прокаткой в сухих валках. Максимальная мощность прокатки при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) падает на 0,24% - с 0,414 кВт до 0,413 кВт. Сумма мощностей прокатки при смазке валков индустриальным маслом И40 (1,137 кВт) в 1,29 раза (22,28%) ниже, чем в сухих валках (1,463 кВт) и в 1,1 раза (7,56%) ниже, чем при смазке валков водой (1,23 кВт). Результаты исследования позволили разработать и опробовать технологию холодной прокатки алюминиевых лент с

технологической смазкой И40 на стане 175x300 за два прохода, обеспечив экономию потребляемой мощности и заданную толщину проката на машиностроительном заводе в городе Донг Най (Вьетнам).

### **Выводы по главе 5**

1. Экспериментально установлено, что применение технологической смазки индустриального масла И40(5%) на промышленном двухвалковом стане 175x300 позволяет уменьшить силу прокатки на 3-6% и увеличить обжатие лент на 2-4%, обеспечив возможность сокращения числа проходов прокатки лент на стане с трех до двух и требуемую точность толщины ленты для листовой штамповки деталей.

2. Результаты исследований позволили разработать рациональную технологию прокатки алюминиевых лент из сплава АД33 с уменьшением неравномерности распределения по длине проката сил прокатки на 15-23%, обжатий на 40-70%, а толщины - почти на 70% при применении для смазки валков индустриального масла И40 (5%) на промышленном двухвалковом стане.

3. Разработка и внедрение новых режимов прокатки с применением технологической смазки индустриальным маслом И40 на двухвалковом стане 175x300, обеспечили заданную точность толщины 0,55мм по длине лент при значительном сокращении времени на деформацию и снижении расходов (3-4%) на электроэнергию на машиностроительном заводе в г. Донг Най.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности изменения прочностных и пластической характеристик от степени холодной деформации полос алюминиевого сплава АД33 известного химического состава. Получены адекватные регрессионные уравнения для расчета предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения алюминиевого сплава АД33 при прокатке полос и лент с обжатием до 30%.

2. Установлены закономерности изменения твердости от обжатия полос из алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке. Получены уравнения для расчета величин твердости по Бринеллю (НВ) и Виккерсу (НV) от степени деформации.

3. Получены зависимости основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от показателей твердостей по Бринеллю (НВ) и Виккерсу (НV) прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33. Полученные регрессионные уравнения позволяют определять основные механические свойства полос и лент из алюминиевого сплава АД33 по твердостям (НВ и НV) с высокими коэффициентами корреляции.

4. Установлены закономерности влияния условий контактного трения на формирование деформационных, силовых показателей прокатки и толщину полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц в периоды неустановившихся и квазистационарных условиях деформирования.

5. Получены количественные закономерности влияния различных технологических смазок на неравномерность распределения силы прокатки, относительного обжатия и толщины по длине полос и лент алюминиевых сплавов АД33 и АМц при холодной прокатке.

6. Усовершенствованы математическая модель и алгоритм расчета среднего давления и силы прокатки, обеспечивающие повышение точности определения параметров холодной прокатки по длине тонких полос и лент. Показано, что применение формулы М.Д Стоуна при расчете коэффициента  $n_{cp}$  - напряженного

состояния и учет коэффициента  $n_b$  влияния внешних частей полосы на очаг деформации позволяют, с математическим ожиданием погрешности 5,0% (АДЗЗ) и 5,8% (АМц), повысить точность определения сил в установившийся период (основной) прокатки тонких полос из алюминиевых сплавов. Уточнено уравнение для расчета среднего давления на концевых участках лент с учетом коэффициента контактного трения, что позволит повысить на 1-2% точность определения сил прокатки в нестационарные периоды деформирования.

7. Применение компьютерного моделирования, с помощью программы QForm 3D, позволило определить не контролируемые параметры по длине раската и спроектировать рациональный деформационный и силовой режим холодной прокатки лент из сплава АДЗЗ на промышленном стане 175x300 с технологической смазкой И40.

8. Результаты работы были использованы в промышленности и университетах:

- Разработаны и внедрены новые режимы холодной прокатки алюминиевых лент АДЗЗ на стане 175x300 технологическими смазками, которые обеспечили повышение точности толщины по длине проката, сокращение времени на деформацию и снижение расходов на электроэнергию на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме.

- В Московском политехническом университете при внедрении в учебный процесс новой лабораторной работы по влиянию технологических смазок на деформационно-силовые показатели при холодной прокатке полос.

- В «Чан Дай Нгхиа» университете (Вьетнам) при внедрении в учебный процесс разработки по влиянию технологических смазок на деформационно-силовые показатели при прокатке при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением»..

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Короновский Н.В. Основы геологии: Учеб. Для географ. спец. вузов/ Н.В. Короновский, А.Ф. Якушева - М.: Высш.шк. 1991. 416 с., ил. ISBN 5-06-0017303.
2. Беляев А. И. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник / А. И. Беляев [и др.]. М.: Металлургия. 1983. 280с.
3. Staley J. Advances in aluminium alloy products for structural applications in transportation/ J. Staley, D. Lege// Journal de Physique IV Proceedings, EDP Sciences, 1993, 03 (C7), pp.C7-179-C7-190. 10.1051/jp4:1993728. jpa-00251921.
4. Aluminium Alloy Tanker, Yongqiang Vehicles Manufacturing Co., 2011.
5. Heinz A. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications / A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2000. Vol. 280. No 1. P. 102-107. DOI 10.1016/S0921-5093(99)00674-7.
6. Конюхов А. Д. Механические свойства алюминиевых сплавов и их сварных соединений, применяемых в кузовах полувагона/ А. Д. Конюхов., Л. В. Журавлева., А. К Шуртаков // Цветные металлы. 2006. №6. С. 68-73.
7. Официальный сайт Алюминиевой ассоциации «Объединение производителей, поставщиков и потребителей алюминия» [Электронный ресурс]. [http://www.aluminas.ru/aluminum/in\\_the\\_world](http://www.aluminas.ru/aluminum/in_the_world) (дата обращения: 28.12.2021).
8. Aluminum Statistical Review for 1999 (Washington, D.C.: The Aluminum Association, Inc., 2000).
9. Robert E. Technology Innovation in Aluminum Products/ E. Robert, Jr. Sanders // JOM. 53 (2). (2001). P. 21 - 25.
10. Райков Ю.Н. Мировая алюминиевая промышленность. Компании, технологии, оборудование: Справочник/ Ю.Н. Райков, Г.Н. Кручер. -М.: ОАО «Ин-т Цветмет обработка». 2014. 304 с.
11. Чернавина Д. А. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Д. А. Чернавина, Е. А. Чернавин, А. В. Фаллер, М. Ю. Зданович. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2018. № 17 (203). С. 206-210.

12. Сайт об Алюминии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.aluminiumleader.ru> (дата обращения: 28.12.2021).
13. Геологическая служба США [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.usgs.gov> (дата обращения: 28.12.2021).
14. ГОСТ 21631-2019 "Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия". - Введ. 01.6.2020. — М.: Издательство стандартов. 2020.
15. ГОСТ 21488-97 "Прутки, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические средства". - Введ. 01.01.1999. — М.: Издательство стандартов. 1999.
16. Самусев С. В. Расчет размеров трубной заготовки для производства труб большого диаметра в линии ТЭСА по схеме UOE / С. В. Самусев, В. А. Фадеев // Сталь. 2020. № 4. С. 33-37.
17. Бровман М.Я. Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки. Перспективы развития металлургической промышленности. Saarbrücken, Deutschland / Германия. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 626 с.
18. Шур, И. А. Процесс непрерывного прессования тонкостенных труб из алюминиевых сплавов / И. А. Шур, Н. А. Чиченев, А. А. Сидорин // Производство проката. – 2010. – № 5. – С. 36-43.
19. Райков Ю.Н. Производство и потребление проката тяжелых цветных металлов / Ю.Н. Райков // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Национальный исследовательских технологический университет «МИСиС», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. М.: 2014. Т.1. С. 59-60.
20. Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки / А.В. Третьяков. М.: Металлургия. 1966. 255 с.
21. Полухин П.И. Прокатное производство / П. И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев. – М.: Металлургия. 1982. 696 с.
22. Белосевич В.К. Эмульсии и смазки при холодной прокатке / В.К. Белосевич, Н.П. Нетесов, В.И. Мелешко, С.Д. Адамский. М.: Металлургия. 1976.

416 с.

23. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопркатное производство / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. Киев. «Выща школа». 1988. 351 с.

24. Бельский, С.М. Деформация полосы при симметричной и асимметричной прокатке: учебное пособие для вузов/ С.М. Бельский // Липецк: ЛГТУ, 2008. 235 с.

25. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением/ В.Л. Колмогоров. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ). 2001. 836 с.

26. Богатов А.А., Ресурс пластичности металлов при обработке давлением/ А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия. 1984. 144с.

27. Шевелев В.В. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку/ В.В. Шевелев, С.П. Яковлев. – М.: Машиностроение. 1972. 136с.

28. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке / М.Я. Бровман. – М.: Металлургия. 1991. 265 с.

29. Бровман М.Я. Развитие прокатного производства за 500 лет / М.Я. Бровман, А.Ф Пименов // Вестник машиностроения. 2004. № 11. С. 74–82.

30. Колесников А.Г. Распределение деформации по толщине сляба при прокатке на толстолистовом стане / А.Г. Колесников, А.В. Мунтин, А.Г. Зинягин, Д.А. Рингинен // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 11. С. 32-36.

31. Меерович И.М. Прокатка плит и листов из легких сплавов / И.М. Меерович. М.: Металлургия. 1969. 252 с.

32. Белевитин В.А. Технология конструкционных материалов: обработка металлов давлением: учебное пособие / В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та. 2015. 184 с.: ил.

33. Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / С.Б. Сидельников, Р.И. Галиев, Д.Ю. Горбунов [и др.] – Электрон. издание. (3 Мб). –

Красноярск: ИПК СФУ, 2008.

34. Чеботарев В.А. Литейно-прокатные агрегаты для производства катанки, листов и лент из цветных металлов/ В.А. Чеботарев, А.В. Самсонов // Тяжелое машиностроение. 2007. №5. С.20-27.

35. Ильюшин А.А. Пластичность. Часть первая. Упругопластические деформации / А.А. Ильюшин. – М. Издание МГУ. 2004. 376 с.

36. Кийко И.А. Теория пластического течения / И.А. Кийко – М.: Изд. МГУ. 1978. 75с.

37. Мастеров В.А. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением/ В.А. Мастеров, В. С. Берковский – М.: Metallurgia. 1989. 400с.

38. Мазур В.Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения)/В.Л. Мазур, А.В. Ноговицын. – Днепропетровск. «Днепр – VAL». 2010. 498 с.

39. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - М.: Metallurgia. 1986. 688 с.

40. Целиков А.И. Теория прокатки: Справочник/А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин, А.В. Третьяков, Г.С. Никитин. – М.: Metallurgia. 1982. 335с.

41. Василев Я. Д. Теория продольной прокатки: учебник для магистрантов вузов / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. - Донецк: УНИТЕХ. 2010. 456 с.

42. Грудев А. П. Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб и доп / А.П. Грудев. – М.: Интернет Инжиниринг. 2001. 280 с.

43. Шаталов Р.Л. Проектирование параметров процессов листовой прокатки: учебное пособие / Р.Л. Шаталов. – Москва: Московский Политех. 2018. 185 с.

44. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник/ Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М.: Metallurgia. 1986. 483с.

45. Рокотян Е.С. Энергосиловые параметры обжимных и листовых станов/ Е.С. Рокотян, С.Е. Рокотян. Изд. – М: Metallurgia. 1968. 270 с.

46. Кокорин В.Н. Применение смазочно-охлаждающих технологических

жидкостей в производстве прокатки листового материала: учебное пособие / В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов. – Ульяновск: УлГТУ. 2004. 55 с.

47. Кривенцов А.М. Разработка метода и определение на его основе коэффициента трения при горячей, тёплой и холодной прокатке чёрных и цветных металлов/ А.М. Кривенцов // Калибровочное бюро ([www.passdesign.ru](http://www.passdesign.ru)). 2015. Вып. 6. С.40-49.

48. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. М.: Metallurgiya. 1973. 288с.

49. Павлов И. М. Влияние удельного давления при прокатке на коэффициент трения/ И.М. Павлов, Н. Н. Гет // Metallurg. 1936. №7. С. 47-54.

50. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. Изд. – М: Metallurgiya. 1982. 312 с.

51. Павлов И. М. О роли внешних частей полосы в различных случаях прокатки / И.М. Павлов // Изв. АН СССР. Металлы. 1969. № 6. С. 101-106.

52. Pietrzyk M, Lenard J.G. Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process. Springer-Verlag. Heidelberg. 1991. 201p.

53. Lenard J.G. The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in cold rolling / J.G. Lenard // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 80–81. 1998. P. 232-238.

54. Шаталов Р.Л. Влияние смазочных материалов и моделей контактного давления на силу прокатки по длине тонких медных полос / Р.Л. Шаталов, В.К. Чан, В.Х. Фам // Технология металлов. 2021. № 8. С. 41-50.

55. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.: Metallurgiya. 1995. 368 с.

56. Василев Я.Д. Повышение точности расчета коэффициента трения при холодной полосовой прокатке/ Я. Д. Василев, Р. А. Замогильный, Д. Н. Самокиш, А. В. Олейник// Обработка материалов давлением. 2017. № 1(44). С. 187-191.

57. Василев Я.Д. Методика оценки антифрикционной эффективности технологических смазок при холодной прокатке по их физико-химическим

свойствам / Я.Д. Василев, Р.А. Замогильный, Д.Н. Самокиш // черная металлургия: бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. №4. С.54-59.

58. Василев Я.Д. Методика расчета коэффициента трения при холодной прокатке с эмульсией на основе эмпирических зависимостей/ Я. Д. Василев// производство прокатка. 2012. №7. С.2-7.

59. Василев Я.Д. Инженерные методика расчета температуры полосы при холодной прокатке/ Я. Д. Василев// производство прокатка. 2012. №6. С.15-19.

60. Василев Я.Д. Основы теории продольной холодной прокатки. Пластическая деформация металлов: колл.монография/ Я. Д. Василев. — Днепропетровск: Акцент ПП. 2014. С. 107–125.

61. Рудской А.И. Теория и технология прокатного производства: Учеб. Пособие/ А.И. Рудской, В.А. Лунев. – СПб.: Наука. 2005. 540 с.

62. Kármán Th.V. Beitrag zur Theorie des Walzvorgang / Th.V. Karman // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. 1925. V.5. Iss.2. P.139-141.

63. Баранов Г.Л. Совершенствование расчета контактных напряжений при прокатке полосы / Г.Л. Баранов // Сталь. 2015. № 6. С. 34–39.

64. Шаталов Р.Л. Влияние внешних частей полосы на деформационные и силовые параметры при тонколистовой прокатке / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов// Металлург. 2020. №7. С. 77–84.

65. Зайков М.А., Полухин В.П., Зайков А. М., Смирнов Л. Н. Процесс прокатки. Справочник М.: МИСиС. 2004. 640 с.

66. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. - Введ. 16.07.1984. — М.: Издательство стандартов. 1984.

67. Боровушкин И.В. Определение механических свойств металлов и сплавов: Учебное пособие / И.В. Боровушкин, Л.М. Киселев. – 2–е изд., перераб. – Сыктывкар: СЛИ. 2012. 107 с.

68. Калпин Ю.Г. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. М.: Московский государственный технический университет «МАМИ». 2007. 113 с.

69. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник/А.В Третьяков, В. И. Зюзин. 2-е изд. М.: Металлургия. 1973. 224 с.

70. Корягин Ю.Д. Структура и свойства алюминиевого сплава 1421, подвергнутого пластической деформации и термообработке / Ю.Д. Корягин, В.И. Краинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т17. №3. С.64-72.

71. Шаталов Р. Л. Определение механических свойств медных и латунных полос по показателям твёрдости при холодной прокатке/ Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.Л. Зисельман // Цветные металлы. 2014. №5. С 61-65.

72. Шаталов Р. Л. Определение механических свойств медных (М0) полос по показателям твердости по Виккерсу и Бринеллю при холодной прокатке / Р.Л. Шаталов, В.К. Чан, В.Х. Фам // Metallurg. 2021. № 11. С. 51-55.

73. Бровман М.Я. О сопротивлении пластической деформации в процессах прокатки и непрерывного литья металлов/ М.Я. Бровман // Металлы. 2004. № 3. С. 24-33.

74. Юсупов В.С. Механические свойства медно-алюминиевого композита после ротационной ковки/В.С. Юсупов, С.О. Рогачев, Р.В. Сундеев, В.А. Андреев [и др.]//Перспективные Материалы и технологии: Материалы международного симпозиума, Минск, 23–27 августа 2021 года. – Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2021. – С. 185-186.

75. Lee S.H. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding/ S.H. Lee, Y. Saito, T. Sakai, H. Utsunomiya // Materials Science and Engineering: A. Vol. 325. Iss.1–2. 2002. P. 228-235.

76. Baranov V.N. Research of rolling regimes and mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from experimental alloys of Al-Mg system, economical alloyed by scandium/ V.N. Baranov, S.B. Sidelnikov, A.I. Bezrukikh, E.Y. Zenkin // Tsvetnye Menally. 2017. №.9. P. 83-88.

77. Kwon Y.J. Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process/ Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito // Scripta Materialia. Vol.49. Iss.8. 2003. P. 785-789.

78. Kanghua Chen. The improvement of constituent dissolution and mechanical properties of 7055 aluminum alloy by stepped heat treatments/ Kanghua Chen, Hongwei Liu, Zhuo Zhang, Song Li, Richard I. Todd // *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 142. Iss. 1. 2003. P. 190-196.

79. Дегтярев М.В. Установление соответствия между степенью деформации, твердостью и размерами элементов структуры железа и конструкционных сталей при большой пластической деформации различными способами/ М.В. Дегтярев, Т.И. Чашухина, Л.М. Воронова, В.И. Копылов // *Физическая мезомеханика*. 2013. 16(6). С. 71-80.

80. Болобов В.И. Зависимости твердости металлов от степени пластической деформации при различных способах деформирования / В.И. Болобов, В.С. Бочков, С.А. Чупин, П.П. Бондаренко, С. Цинянь // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. 81(6). С. 52-56.

81. Калмыков А. С. Влияние деформационных условий прокатки латунных листов на структуру и твердость / А.С. Калмыков, Р.Л. Шаталов, А.Л. Генкин // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2019. Вып. 5. С. 152–155.

82. Costa M.I. Analysis of AA 6082-T6 welds strength mismatch: stress versus hardness relationships/ M.I. Costa, D.M. Rodrigues, C. Leitão // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. 79(5-8). P. 719–727.

83. Song M. Modeling the hardness and yield strength evolutions of aluminum alloy with rod/needle-shaped precipitates / M. Song // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. 443(1-2). P. 172–177.

84. Safeen W. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology/ W. Safeen, S. Hussain, A. Wasim, M. Jahanzaib, H. Aziz, H. Abdalla // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. 87(5-8). P. 1765–1781.

85. Капланов В.И. Методики и результаты оценки эффективности технологических смазок при холодной прокатке / В.И. Капланов, И.С. Сухоруков, А.Г. Присяжный // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. Vol.5. №.7. С. 49–53.

86. Белосевич В.К. Эмульсии для холодной прокатки (Методика разработки составов эмульсий) / В.К. Белосевич, С.М. Ионов // Производство проката. 1999. № 8. С. 3-6.

87. Белосевич В.К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали / В. К. Белосевич. – М.: Metallurgiya. 1989. 256 с.

88. Белосевич В.К. Эмульсии для холодной прокатки. Исследование и расчет тепловых режимов непрерывных станов холодной прокатки листов / В.К. Белосевич, С.М. Ионов // Производство проката. 1999. № 2. С. 3-7.

89. Dick K. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips / K. Dick, JG. Lenard // Journal of Materials Processing Technology. Vol.168. Iss.1. 2005. P. 16-24.

90. Латутова М.Н, Лукина Л.Г. Смазочные материалы: Учебное пособие. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения. 2007. 56с.

91. Снегирёв И.В, Логинов Ю.Н. Влияние кинематической вязкости смазочно-охлаждающей жидкости на усилие холодной прокатки алюминиевого сплава// Magnitogorsk Rolling Practice 2018: материалы III молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2018. С. 36-37.

92. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, В.Т. Тилик – М.: Metallurgiya. 1975. 368 с.

93. Кривцова О. Н. Технологические смазки станов холодной прокатки и их оценка / О. Н. Кривцова, Д. В. Самсонов, А. С. Арбуз [и др.] // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященной памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова, [г. Екатеринбург, 26-30 ноября 2013 г.]. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2014. С. 77-80.

94. Кокоркин В.Н. Применение смазочно-охлаждающих технологических жидкостей в производстве прокатки листового материала / В.Н. Кокоркин, Ю.А. Титов: Ульяновск. 2004. 57 с.

95. Ионов С.М. Оценка технологических смазок для холодной прокатки листов с помощью комплексного критерия эффективности / С.М. Ионов, В.К. Белосевич // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1998. №9. С. 36-38.
96. Климущкин А.Н и др., Технологическая инструкция ТИ ПХ-03-2003. - Темиртау: ОАО «Испат-Кармет». 2006. 127 с.
97. Капланов В.И. Экспериментальное исследование водных эмульсий новых технологических смазок при холодной прокатке тонких полос / В.И. Капланов, Н.В. Лепорская, Л.Н. Радужева, В.Н. Куркчи // ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ 2003р. 2003. Вип. 13. С.1-3.
98. Шаталов Р.Л. Влияние смазок на деформационные, силовые показатели и размеры медных и латунных листов при прокатке/ Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, К.В. Чан // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 12. С.125-128.
99. Wilson W.R.D. Tribology in Cold Metal Forming/ W.R.D. Wilson// Journal of Manufacturing Science and Engineering.119 (1997). P. 695-698.
100. Белосевич В.К, Вансович В.П, Чамин И.А, Смирнов Г.В. Современные системы технологической смазки и охлаждение листовых станов холодной прокатки в СССР и за рубежом. М.: НИИинформтяжмаш, 1967. № 1-67-5. 55 с.
101. J.D. Edwards, F.C. Frary, and Z. Jeffries, in Ref. 4. P. 245.
102. ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. - Введ. 01.09.2019. - М.: Издательство стандартов. 2019.
103. Reza Nasiri Dehsorkhi. Investigation on microstructure and mechanical properties of Al–Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process / Reza Nasiri Dehsorkhi, Fathallah Qods, Mohammad Tajally // Materials Science and Engineering: A. Vol.530. 2011. P. 63-72.
104. Ali Abd El-Aty. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review/ Ali Abd El-Aty, Yong Xu, Xunzhong Guo, Shi-Hong Zhang, Yan Ma, Dayong Chen // Journal of Advanced Research. Vol. 10. 5.2018. P.49-67.
105. J.R. Davis & Associates., Aluminum and aluminum alloys/Materials Park,

ОН: ASM International, ©1993. 784p.

106. Шаталов Р.Л. Влияние смазок и моделей контактного давления на силу прокатки по длине тонких алюминиевых полос / Р. Л. Шаталов, В. Х. Фам, В. К. Чан // *Металлург*. 2021. № 6. С. 64-72.

107. Shatalov R.L. Influence of Lubricants and Contact Pressure Models on the Rolling Power along Thin Aluminum Stripes/ R. L. Shatalov, V. KH. Pham, V. Q. Tran // *Metallurgist*. Vol. 65. Nos. 5-6. 9.2021. P. 423-432.

108. Шаталов Р.Л. Создание и исследование микропроцессорной системы контроля усилий прокатки на двухвалковом листовом стане / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, Ю.Ф. Тимин // *Металлург*. 2015. № 10. С. 70–73.

109. Шаталов Р.Л. Определение кривой упрочнения и механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава/ Р.Л. Шаталов, В.Х. Фам, В.К. Чан// *Цветные металлы*. 2021. № 12. С. 70-76.

110. Shatalov R.L. Determining the hardening curve and mechanical properties of rolled strips made of aluminium alloy AD33 with known chemical composition / R.L. Shatalov, V.Kh. Fam, V.K. Chan // *Tsvetnye Metally*. 2021. №12. DOI 10.17580/tsm.2021.12.10.

111. Шаталов Р. Л, Фам В. Х, Чан В.К. Исследование механических свойств полос из сплавов цветных металлов при холодной прокатке. Сборник конференции. Труды XIII Конгресса прокатчиков. Том 1. Москва. 2022. С.230-236.

112. Марковец М.П. О зависимости между твердостью и другими механическими свойствами металлов. "Исследование в области измерения твердости". Труды метрологических институтов СССР. – М.-Л.: Изд-во стандартов. 1967. Вып. 91 (151). 76 с.

113. Матюнин В.М. Способ определения твердости материалов вдавливанием пирамиды на разных масштабных уровнях индентирования / В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков, Р.Ю. Агафонов // *Технология металлов*. 2014. №6. С. 44–47.

114. Чукин М.В. Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости / М.В. Чукин, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. №1. С. 28-35.

115. ГОСТ 2999–75 (СТ СЭВ 470–77). Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. - введ. 28.07.1975. - М.: Издательство стандартов. 1975.

116. Шаталов Р.Л. Определение механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 по различным показателям твердости при холодной прокатке / Р.Л. Шаталов, В.Х Фам, В.К Чан // Технология металлов. 2021. № 9. С. 31-37.

117. ASTM E140-12B e1, Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness, //ASTM International. West Conshohocken. PA. 2019.

118. Арышенский Е.В. Исследование влияния точности прокатки заготовок на производство корпусов банок под напитки / Е.В. Арышенский, [и. др] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук № 6. 2011. С. 269 – 273.

119. Арышенский Е.В. Изучение влияния композиции смазочных жидкостей на усилие прокатки / Е.В. Арышенский, М.А. Панкратов, В.Ю. Арышенский, Э.Д. Беглов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 3. С. 11–13.

120. Зиновьев А.В., Колпашников А.И., Полухин П.И. и др. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1992. 512с.

121. Арышенский Е.В. Исследование антифрикционных свойств прокатной смазки для алюминиевых сплавов методом предельного обжатия / Е.В. Арышенский, В.В. Яшин, И.А. Латушкин, А.В. Баев // Фундаментальные исследования. 2015. № 3-1. С. 15–18.

122. Шаталов Р.Л., Фам В.Х., Чан В.К. Исследование влияния различных технологических смазок на показатели прокатки полос из алюминиевых сплавов/

Р. Л. Шаталов, В. Х. Фам, В. К. Чан // *Металлург*. 2022. № 2. С. 90-95.

123. Ионов С.М. Разработка информационно-расчетной системы "Трение и технологические смазки" для холодной листовой прокатки / С.М. Ионов, А. В. Зиновьев // *Производство проката*. 2002. № 12. С. 9-12.

124. Лукашкин Н.Д, Кохан Л.С, Лебедев Н.Н. Напряжения и деформации в процессах обработки металлов давлением. М.: Академкнига. 2004. 240 с.

125. Кучеряев Б.В. Экспериментальная проверка формулы для расчета энергосиловых параметров листовой прокатки / Б.В. Кучеряев, А.В. Зиновьев, В.Б. Крахт // *Производство проката*. 2002. № 4. С. 2-9.

126. Lijesh K.P. On the Degradation of Tribo-components in Boundary and Mixed Lubrication Regimes / K.P. Lijesh, M.M. Khonsari // *Tribol Lett* 67. 12 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1125-8>.

127. Muzakkir S. M. Failure mode and effect analysis of journal bearing / S.M. Muzakkir, K.P. Lijesh, Harish Hirani // *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Vol. 10, №16 (2015). P 36843-36850.

128. Lijesh K.P. Control on wear of journal bearing operating in mixed lubrication regime using grooving arrangements / K.P. Lijesh, S.M. Muzakkir, H. Hirani, D.T. Gananath // *Industrial Lubrication and Tribology* 68. 2016. №. 4. P.458-465.

129. Lu Zhong-wu. The influences of materials flows in steel manufacturing process on its energy intensity / Lu Zhong-wu, Jiu-ju Cai, Qing-bo Yu, and Anguo Xie // *Acta Metallurgica Sinica-Chinese Edition*- 36. 2000. №.4. P. 370-378.

130. Isfahani S.N.R. A hybrid micro gas turbine and solid state fuel cell power plant with hydrogen production and CO2 capture/ S.N.R. Isfahani, A. Sedaghat // *International journal of Hydrogen Energy*. 41(22). 2016. P. 9490-9499.

131. Фам В.Х. Компьютерное моделирование холодной прокатки полос из алюминиевого сплава АД33 с применением разных смазок валков. Сборник конференции. V Международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. проектирование, создание и модернизация». Санкт-Петербург. 2022. №5. С5-7.

132. Горбатюк, С. М. Компьютерное моделирование системы охлаждения валков чистовой клетки широкополосного стана горячей прокатки и разработка новой схемы охлаждения / С. М. Горбатюк, С. П. Романов, И. Г. Морозова // *Металлург*. 2019. № 8. С. 59-62.

133. Шаталов Р.Л. Повышение качества полос из цветных металлов и сплавов // *Цветные металлы*. 2001. № 5. С. 65–70.

134. Русаков А.Д. Исследование различных методов формирования микрогеометрии валков для холодной прокатки высокоточных полос и лент / А.Д. Русаков, А.И. Трайно, В.С. Юсупов // *Производство проката*. 2007. № 12. С. 39-41.

135. Горлова А.А. Комплекс оборудования для выпуска холоднокатаной полосы и ленты из прецизионных сплавов / А.А. Горлова, С.В. Родинков, В.В. Аксенов // *Металлург*. 2011. № 11. С. 82-86.

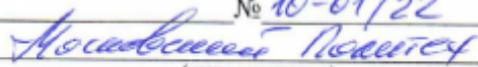
136. Фам В.Х. Исследование эффективности применения смазки валков при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на промышленном двухвалковом стане 175x300 / В.Х. Фам, Р.Л. Шаталов, В.К. Чан, С.Х. Хуинь // *Цветные металлы*. 2022. № 8. С. 78-84.



**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**  
**О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС УНИВЕРСИТЕТА**  
**РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ РАБОТЫ**  
**(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

АКТ

№ 10-01/22  
  
 (место составления)

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по научной работе  
 К.Т.Н.  
 А.Ю. Наливайко  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.  
 (подпись)



**О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Исследование и совершенствование условий деформирования при холодной прокатке с целью стабилизации толщины по длине лент сплава АД33 и снижения энергосиловых параметров процесса», выполненной аспирантом кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Фам Вьет Хоанг.**

Мы, нижеподписавшиеся начальник учебно-методического управления, декан факультета машиностроения, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
 (научно-исследовательской или диссертационной)

по теме «Исследование и совершенствование условий деформирования при холодной прокатке с целью стабилизации толщины по длине лент сплава АД33 и снижения энергосиловых параметров процесса» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов направлений подготовки: 15.03.01 «Машиностроение» (профиль «Машины и технологии обработки металлов давлением в метизных производствах), в форме лабораторной работы по теме «Исследование и совершенствование условий деформирования при холодной прокатке с целью стабилизации толщины по длине лент сплава АД33 и снижения энергосиловых параметров процесса».

(направления подготовки: шифры и названия)

Кафедра, внедрившая результаты: «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии».

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол №2 от 28.09.2022.

Начало использования объекта внедрения: 01 ноября 2022 года.

Начальник учебно-методического  
управления

  
 (личная подпись) А.Б. Максимов

Декан факультета,  
внедривший разработку

  
 (личная подпись) Е.В. Сафонов

Заведующий кафедрой

  
 (личная подпись) Д.А. Гневашев

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**О ВНЕДРЕНИИ В ВЬЕТНАМСКОМ ЗАВОДЕ**  
**РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ РАБОТЫ**  
**(ВЬЕТНАМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ЧАН ДАЙ НГХИА)**

«УТВЕРЖДАЮ»



Ректор университета «Чан Дай Нгхиа»,

к.т.н., Чан Хонг Тхань

« 28 » ноября 2022 г.

**АКТ**

об использовании результатов кандидаткой диссертации Фам Вьет Хоанга на тему: «Исследование и совершенствование условий деформирования при холодной прокатке с целью стабилизации толщины по длине лент сплава АД33 и снижения энергосиловых параметров процесса» в учебном процессе университета «Чан Дай Нгхиа», г.Хошиминь, Вьетнам

Комиссия в составе председателя – проректора организации учебного процесса университета «Чан Дай Нгхиа», к.т.н., доцент Лыонг Хонг Сэм и членов: Начальника отдела обучения к.т.н., Дао Нгок Диеп и заместителя декана факультета «Машиностроение» составила настоящий акт, которым подтверждается что результаты диссертации Фам Вьет Хоанга использованы в учебном процессе при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением».

Проректора организации учебного процесса,

Лыонг Хонг Сэм

к.т.н., доцент

Начальник отдел обучения,

Дао Нгок Диеп

к.т.н.,

Заместитель декана факультета «Машиностроение»

Фам Хонг Тхань

к.т.н.,