

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский Политех)

На правах рукописи

**ЧАН ВУ КУАНГ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК ПРИ  
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ МЕДНЫХ ЛЕНТ НА ИХ ТОЛЩИНУ И  
ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ 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 – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### Введение

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯМ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ, МЕТОДАМ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ.....	13
1.1. Очаг деформации и физические основы внешнего трения в очаге деформации.....	13
1.2. Анализ основных методов расчета давления и силы при холодной прокатке. ....	21
1.3. Влияние технологических смазок на контактное напряжение при холодной прокатке тонких полос.....	30
1.4. Сопротивление металла деформации и зависимость его от степени пластической деформации при холодной прокатке тонких полос. ....	32
1.5. Взаимосвязь между различными показателями механических свойств металла при холодной прокатке. ....	35
Выводы по главе 1 и задачи исследования.....	41
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДИ М0 КОНКРЕТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОС.....	44
2.1. Исследование химического состава и определение марки меди прокатываемых полос. ....	44
2.2. Обоснование режима отжига медных полос.....	45
2.3. Методика эксперимента и результаты холодной прокатки тонких полос из медного (М0) сплава на лабораторном стане 150х235.....	45

2.4. Определение механических свойств полос из меди М0 известного химического состава .....	47
2.5. Определение основных механических свойств медных (М0) полос по показателям твердости по Виккерсу и Бринеллю при холодной прокатке. ....	54
Выводы по главе 2 .....	63
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ, СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И РАЗМЕРЫ ПО ДЛИНЕ ПОЛОС ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ МЕДНОГО М0 СПЛАВА. 65	
3.1. Влияние технологических смазок на степень деформации, силу прокатки и размеры по длине медных полос при холодной прокатке. ....	65
3.2. Усовершенствование метода расчета контактного давления и силы при холодной прокатки медных (М0) полос. ....	72
3.3. Влияние условий контактного трения на потребляемую мощность при прокатке полос.....	79
Выводы по главе 3 .....	83
Глава 4: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС ИЗ МЕДИ .....	85
4.1. Построение модели материала и процесса прокатки в программе Qform 3D. ....	85
4.2. Компьютерное моделирование процесса прокатки процесса прокатки полос из меди.....	87
4.3. Влияние технологических смазок на распределение силы и мощности при прокатке листовых заготовок.....	89
Выводы по главе 4.....	92
Глава 5: РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ МЕДИ М0 НА ПРОМЫШЛЕННОМ ДВУХВАЛКОВЫМ СТАНЕ 175x300 .....	93

5.1. Исследование технологии прокатки и нагрузок на стане 175x300.....	93
5.2. Исследование применимости результатов физического и компьютерного моделирования для совершенствования режимов прокатки на промышленном стане.....	95
Выводы по главе 5.....	106
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	107
Список литературы .....	109
Приложение	

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** На промышленных станах прокатка полос и лент из стали и цветных металлов проводится с применением технологических смазок и смазочно-охлаждающих жидкостей, на основе минеральных и растительных масел. Прокатка различных материалов в стальных валках с применением одной и той же смазки приводит к не одинаковому влиянию на силу, мощность прокатки и размеры полос. 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 производство точных лент. На машиностроительных заводах Вьетнама на двухвалковых станах прокатывают тонкие узкие ленты из меди М0, которые используются для листовой штамповки точных деталей. Однако технологические режимы прокатки не обеспечивают заданную точность толщины по длине лент. Поэтому, экспериментальная оценка влияния различных технологических смазок на показатели прокатки лент из меди М0 конкретного химического состава, особенно актуальна для усовершенствования технологии прокатки лент и снижения нагрузок на оборудование на двухвалковом стане 175х300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам).

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 технологических смазок влияет на силу прокатки и формирование размеров по длине полос, 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. 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 меди М0 известного химического состава позволяет повысить точность расчета силовых параметров процесса листовой холодной прокатки и настройку прокатного стана. 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 от степени деформации позволяет, с использованиями автоматизированных систем, проектировать рациональные технологические режимы прокатки медных лент и полос 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 применением различных технологических смазок.

Недостаточно исследовано влияние различных технологических смазок на формирование деформационных и силовых показателей по длине полос из меди при холодной прокатке.

Поэтому исследование влияния технологических смазок на распределение деформационных, силовых показателей прокатки и толщины по длине тонких медных лент актуально.

**Цель работы.** Усовершенствование режимов прокатки с технологическими смазками для выравнивания толщины по длине медных лент и снижения энергосиловых показателей процесса.

Для достижения цели были поставлены **задачи исследования:**

1. Анализ эффективности применяемых технологических смазок на листовых станах российских и вьетнамских заводов для улучшения качества полос и лент из цветных металлов и сплавов.

2. Экспериментальное исследование эффективности влияния различных технологических смазок на показатели процесса прокатки по длине тонких медных полос и лент.

3. Уточнение закономерностей изменения прочностных и пластических характеристик от степени деформации и зависимостей основных механических свойств от показателя твердости прокатанных полос из меди М0 известного химического состава.

4. Построение уравнений расчета сопротивления деформации и механических свойств меди М0, 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 новых режимов прокатки медных лент с технологическими смазками, обеспечивающих заданную толщину, сокращение времени на деформацию и снижение расходов на

электроэнергию на стане 175х300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най во Вьетнаме.

### **Научная новизна работы.**

1. Установлены закономерности изменения механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения меди М0 известного химического состава от степени деформации при холодной прокатке.

2. Получено уравнение расчета сопротивления деформации меди М0 известного химического состава, позволяющее исследовать и проектировать режимы холодной листовой прокатки на действующих промышленных агрегатах.

3. Получены регрессионные уравнения, связывающее предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение меди М0 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 медных полос и лент 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 меди М0.

6. Усовершенствована модель и алгоритм расчета давления и силы прокатки по длине полос и лент при холодной прокатке, отличающиеся учётом влияния интенсивности упрочнения прокатываемых металлов и сплавов.

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

1. Определили конкретный химический состав деформированных медных (М0) образцов, полученных с машиностроительного завода в г. Донг Най (Вьетнам). Определение химического состава меди проводилось оптико-



эмиссионным спектральным методом с использованием аналитического прибора PMI-MASTER.

2. Опытную прокатку медных полос проводили с обжатиями  $\varepsilon \approx 10; 20$  и  $30\%$  в сухих валках и с различными технологическими смазками: пальмовое масло, смазка прокатная 6% (СПЗ), индустриальное масло 5% (И40), подсолнечное масло 5%. Прокатку полос проводили на двухвалковом прокатном стане 150x235, оснащенном микропроцессорной 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 электронным штангенциркулем с точностью  $\pm 0,01$  мм. В процессе прокатки автоматически измеряли силу прокатки по длине полос с точностью  $\pm 0,01$  кН с использованием установленной на стане микропроцессорной системы контроля сил прокатки. 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 MEKON DUROLINE MH-6 образцов из отожженных и прокатанных полос меди М0.

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

### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны и опробованы рекомендации по усовершенствованию режимов прокатки медных лент с различными технологическими смазками на промышленном стане 175х300 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 для исследования влияния технологических смазок на качество проката, которое используется 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» в городе Хо Ши Минь во Вьетнаме.

3. Разработано научно-методическое описание и подготовлена лабораторная работа для проведения исследования на лабораторном двухвалковом стане 150х235 по влиянию технологических смазок на качество по длине проката, которая используется при преподавании дисциплины «Теория и технология прокатки» на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета.

### **Основные положения, выносимые защиту.**

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

2. Результаты реологических исследований меди известного химического состава и определение механических свойств медного сплава до и после прокатки с обжатиями 10, 20 и 30%. Зависимости основных механических свойств от твердости и связи между механическими показателями при холодной прокатки лент и полос из меди М0.

3. Анализ влияния различных технологических смазок на деформационные, силовые, энергосиловые показатели и толщину по длине полос при холодной

прокатки медных полос на лабораторном двухвалковом стане 150x235 и лент на промышленном стане 175x300.

4. Количественные закономерности влияния технологических смазок на неравномерность распределения силы прокатки, относительного обжатия и толщины по длине тонких полос и лент при холодной прокатке меди М0.

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

6. Разработка рациональных режимов прокатки лент из меди М0 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 лент на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме.

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

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2019» - Московский Политехнический Университет. (Москва, 26/2/2019);

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

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

- 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);

- Международная научно-техническая конференция «Инновационный технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» в МГТУ им. Баумана (Москва. 24-26/5/2022).

**Публикации.** Основные положения диссертации отражены в 15 печатных работах, из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук; 3 статьи в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и списка использованных источников из 131 наименований. Текст диссертации содержит 128 страниц машинописного текста, включающего 12 таблиц и 50 рисунков.

# Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯМ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ, МЕТОДАМ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ.

## 1.1. Очаг деформации и физические основы внешнего трения в очаге деформации

В работах [1 – 5] представлены схемы процесса обжатия и уширения металла при прокатке полосы в валках (рисунок 1.1).

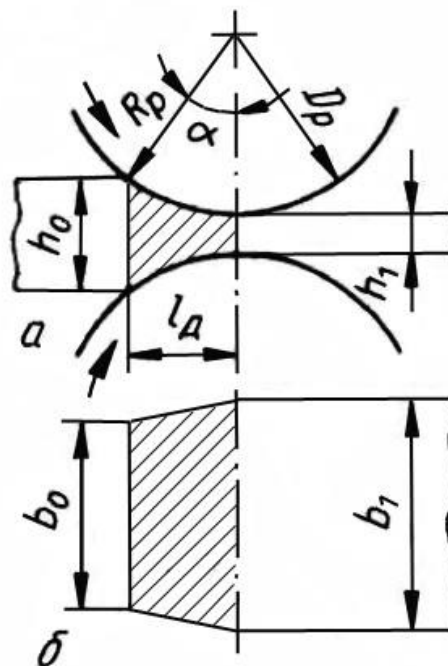


Рисунок 1.1 – Схема очага деформации (а) и уширения (б) при прокатке полосы, где:  $h_0, h_1$  – толщина полосы до (на входе) и после (на выходе) прокатки, мм;  $b_0, b_1$  – ширина полосы на входе и выходе, мм;  $l_d$  – длина дуги захвата в валках, мм;

$R_p, D_p$  – радиус и диаметр рабочих валков, мм;  $\alpha$  – угол захвата, град.

Из практики производства показано, что всегда находятся различные вещества, которые отличаются по своим свойствам от основных взаимодействующих тел между поверхностями валки и полос. Условие контактного трения значительно зависит от состава и количества промежуточных веществ. Смазки оказывают очень большое влияние на процесс трения [6 – 8]. Из толщины разделительного слоя смазки различили три основных вида контактного трения: сухое, граничное и жидкостное трение (рисунок 1.2) [9 – 12].

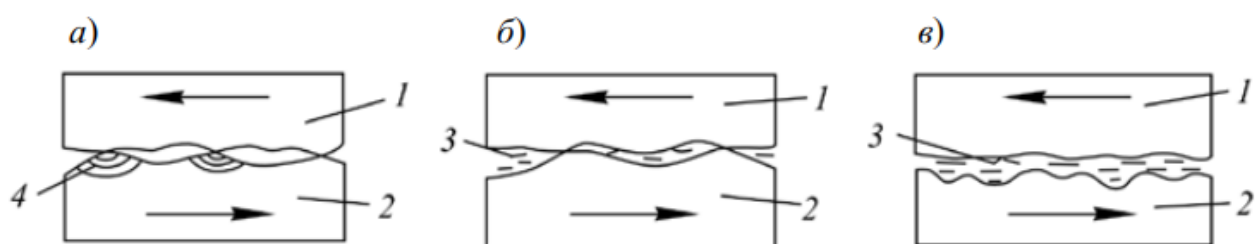


Рисунок 1.2 – Схема разных типов контактного трения: сухое (а), граничное (б) и жидкостное (в) трение; 1 – инструмент, 2 – заготовка, 3 – смазка, 4 – упругопластическая деформация выступа.

*Сухое трение* – когда поверхности трущихся тел абсолютно свободны от смазки и молекул окружающей среды (1.2а) [13, 14]. При прокатке без смазок валков, обнаженных металлических поверхностей обычно происходит их схватывание или сваливание на больших участках и скольжение сопровождается глубоким повреждением поверхностных слоев тел. В этом случае коэффициент трения принимает самые большие значения ( $f = 0,2 - 0,6$ ) [15, 16].

При наличии в очаге деформации тончайших масляных пленок (не более  $10^{-6} - 10^{-4}$  мм) трение называется *граничным* (1.2б) [17, 18]. Контактные касательные напряжения при граничном часто больше, чем при жидкостном. Теория процесса прокатки при граничном трении широко применяется на практике [19, 20].

*Жидкостное трение* (1.2в) происходит, когда между трущимися поверхностями постоянно существует слой смазки толщиной до нескольких десятков тысяч слоев (более  $10^{-4}$  мм) [21 – 23].

Величина силы жидкостного трения зависит от вязкости жидкости и определяется формулой Ньютона:

$$T = \eta \frac{\Delta v F_{ck}}{\xi}, \quad (1.1)$$

где:  $\eta$  – динамическая вязкость смазки;  $F_{ck}$  – площадь поверхности скольжения (контактной поверхности);  $\xi$  – толщина слоя смазки.

Формула (1.1) лежит в основе глубоко разработанной теории гидродинамической смазки [24].

В процессах холодной прокатки специально создают условия, обеспечивающие жидкостное трение. Применение смазки в процессе холодной прокатки позволяет снижать силу прокатки, повышать качество поверхности проката и стойкость инструмента [25, 26].

При прокатке с жидкостным трением коэффициент трения имеет место самый низкий ( $f = 0,003 – 0,009$ ) [27].

На практике производства часто встречаются смешанные виды контактного трения: полусухое и полужидкостное трение [28].

*Полусухое трение* – сочетание граничного трения с сухим, которое исследуется при очень малых количествах смазки между контактными поверхностями валки и полосы.

*Полужидкостное трение* – сочетание жидкостного и сухого (или граничного) трения. При этом на контактными поверхностями имеется слой смазки, который не полностью разделяет поверхности [29, 30].

Полужидкостное трение является наиболее вероятным при высоких нагрузках, малых скоростях скольжения или недостаточно технологической

смазке. В этом случае коэффициент характеризуется широким диапазоном ( $f = 0,01 - 0,2$ ) [31].

В работах [32, 33] представлены основные источники формирования сил трения, которые составляют: механическое зацепление неровностей трущихся поверхностей; молекулярное схватывание поверхностей в точках истинного контакта, образование так называемых мостиков сварки с последующим их разрушением; преодоление сопротивления сдвигу в слое промежуточных веществ, т. е. в микрообъемах разделительной среды.

При прокатке взаимодействие поверхностей валки и полосы в контактной зоне, которое приводит к возникновению силы трения называется фрикционной связью.

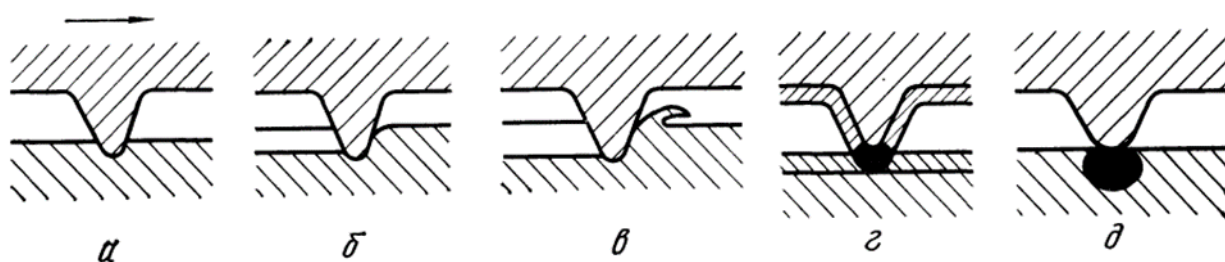


Рисунок 1.3 – Фрикционные связи между поверхностями валки и полосы

На рисунке 1.3 показаны основные виды фрикционных связей [34, 35]:

- 1) Упругое отеснение микровыступом одной поверхности материала другой поверхности (а).
- 2) Пластическое отеснение (б).
- 3) Микрорезание, выцарапывание (в).
- 4) Схватывание и разрушение пленок, покрывающих поверхности трущихся тел, либо слабое схватывание основных поверхностей (г).
- 5) Прочное схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала одного из трущихся тел (д).



Фрикционные связи (а), (б) и (в) относятся к категории механического зацепления, а фрикционные связи (г) и (д) – к категории молекулярного схватывания [36].

**Особенности контактного трения при прокатке.** Важнейшей особенностью контактного трения в зоне деформации является одно из трущихся тел находится в состоянии объемного пластического течения [6].

При прокатке скольжение между поверхностями валки и полосы возникает вследствие пластического формоизменения металла.

В процессе пластической деформации при прокатке резко возрастает плотность контакта поверхностей (см. рисунок 1.4). При этом контурная площадь касания равняется номинальной контактной площади. В этом случае фактическая площадь касания значительно увеличивается, поэтому полный контакт между поверхностями валки и полосы при прокатке не происходит.

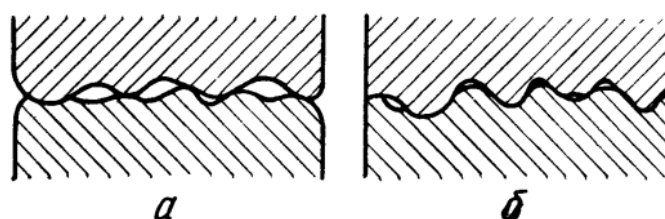


Рисунок 1.4 – Типы контактирования между поверхностями валки и полосы: а – обычное трение; б – пластическое трение

В связи с повышением контактной поверхности увеличивается возможность разрушения окисных пленок и выхода на поверхность внутренних частиц металла [34]. Это обстоятельство способствует проявлению сил молекулярного схватывания при прокатке.

Степень деформации металла на контактной поверхности часто больше, чем сумма деформации валки или полосы. Это можно объяснить тем, что микровыступы поверхности валки впрессовываются в поверхность полосы, создавая местную дополнительную деформацию. Так как слои металла на

контактной поверхности претерпевают более интенсивную деформацию, поэтому механические свойства их (например: предел текучести, предел прочности) должны быть выше, чем в объеме тела.

В процессе пластического трения наличие больших нормальных давлений в очаге деформации, которые значительно превышают предел текучести металла [37].

При холодной прокатки, когда образование окисных пленок заторможено, эффективной разделительной средой служат технологические смазки, наносимые на поверхность валков и полосы [38].

В работах [39, 40] представлен вывод, что при холодной прокатке с технологическими смазками, чаще всего наблюдается полужидкостное трение. Толщина разделительного слоя смазки между контактными поверхностями валки и полосы обычно находится в зоне 0,1 – 3 мкм. Толщина разделительного слоя зависит от типа технологической смазки и состава смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

**Усилия контактного трения при прокатке.** В работах [41, 42] приведена формула для расчета силы прокатки:

$$P = b_{cp} \int_0^{l_d} p_r dx, \quad (1.2)$$

где:  $P$  – сила прокатки, кН;  $p_r$  – нормальное давление, МПа;  $b_{cp}$  – средняя ширина полосы, мм,  $b_{cp} = (b_0 + b_1) / 2$ , мм;  $l_d$  – длина дуги захвата, мм.

Перпендикулярную ей горизонтальную составляющую  $X$  находят в зависимости от направления усилия прокатки.

На практике расчета учитывали величину усилия прокатки как произведение среднего давления  $p_{cp}$  на площадь контактной поверхности между полосой и валкой [43, 44]:

$$P = p_{cp} F, \quad (1.3)$$

где:  $F$  – площадь контактной поверхности в очаге деформации.

Среднее контактное нормальное напряжение (контактное давление) определяют по уравнению

$$p_{cp} = \frac{1}{l_d} \int_0^{l_d} p_r dx, \quad (1.4)$$

Величина  $F$  зависит от геометрических размеров очага деформации, размеров валков и полосы до и после прокатки.

Среднее давление зависит от механических свойств металла (предел текучести  $\sigma_s$ ) и напряженного состояния (контактное трение, внешние зоны, натяжение и др).

Из результатов исследований известных ученых в работах [45 – 47] установлено уравнение для определения среднего давления металла на валки при холодной прокатке:

$$p_{cp} = \gamma \cdot n \cdot \sigma_{cp}, \quad (1.5)$$

где:  $\gamma$  – коэффициент влияния среднего главного нормального напряжения  $\sigma_{cp}$ ;  $n$  – коэффициент влияния напряженного состояния.

При двухмерной прокатке  $\gamma = 1,15$ ; если отношении  $b/l_d \approx 1$  то  $\gamma = 1$ .

При трехмерной прокатке определили  $\gamma$  по формуле М.Л. Зарошинского:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}}, \quad (1.6)$$

где:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – логарифмические деформации.

В.С. Смирнов, используя теорию размерностей, получил зависимости

$$\gamma = 1 + \frac{f}{3} \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \text{ при } 0 < \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \leq \frac{0,465}{f}$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ при } \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \geq \frac{0,465}{f}$$

где:  $f$  – коэффициента трения;  $h_{cp}$  – средняя толщина полосы,  $h_{cp} = (h_0 + h_1) / 2$ , мм.

Вычисляем величину  $n$  по формуле [46 – 48]:

$$n = n_{cp} n_{\sigma} n_b n_n, \quad (1.7)$$

где:  $n_b$  – коэффициент влияния внешнего трения в связи с уширением;  $n_{cp}$  – коэффициент влияния внешнего трения;  $n_{\sigma}$  – коэффициент влияния внешних зон;  $n_n$  – коэффициент влияния натяжения.

**Влияние внешнего трения на усилие прокатки.** Для случая двухмерной равномерной по толщине деформации ( $n_{\sigma} = 1$ ) без натяжения  $n_n = 1$ . Пренебрегая влиянием ширины полосы  $n_b = 1$ , коэффициент влияния внешнего трения на усилие прокатки находим по средней ординате эпюры распределения нормального напряжения контактного давления по дуге захвата [48 – 50]. Контактное давление равно

$$p_{cp} = \frac{P}{F} = \frac{1}{l_d} \int_0^{l_d} p_r dx, \quad (1.8)$$

Представлена А.И. Целиковым формула для определения коэффициента напряженного состояния [50]:

$$n_{cp} = \frac{2h_{\gamma}}{\Delta h(\delta - 1)} \left[ \left( \frac{h_{\gamma}}{h_1} \right)^{\delta} - 1 \right], \quad (1.9)$$

Величину  $h_{\gamma}$  можно определить из равенства давлений в нейтральном сечении, подсчитываемых по уравнению [10]:

$$\frac{h_{\gamma}}{h_1} = \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 + 1)(h_0 / h_1)^{\delta}}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}, \quad (1.10)$$

Для упрощения расчета можно с достаточной точностью принять [47]

$$h_{\gamma} = \sqrt{h_1 h_0}, \quad (1.11)$$

Влияние ширины прокатываемого металла на усилие прокатки. В общем виде влияние ширины полосы можно представить в виде произведения двух

коэффициентов  $\gamma$  и  $n_b$ , из которых первый учитывает влияние  $\sigma_{cp}$ , а второй – изменение влияния внешнего трения в связи с уширением.

Коэффициент  $n_b$  учитывали по формулу С.И. Губкина.

- При  $b_{cp} > l_d$ :

$$n_b = \left( 1 + \frac{3b_{cp} - l_d}{6b_{cp}} \frac{fl_d}{h_{cp}} \right) : \left( 1 + \frac{fl_d}{h_{cp}} \right), \quad (1.12)$$

где:  $b_{cp}$  и  $h_{cp}$  – средняя ширина и толщина полосы, мм;  $l_d$  – длина дуги захвата, мм.

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

$$n_b = \left( 1 + \frac{3b_{cp} - l_d}{3b_{cp}} \frac{l_d}{h_{cp}} \right) : \left( 1 + \frac{l_d}{4h_{cp}} \right), \quad (1.13)$$

## 1.2. Анализ основных методов расчета давления и силы при холодной прокатке.

В технических литературах приведено большое количество формул для расчета контактного давления при холодной прокатке полос, листов и лент. Из теоретических формул, разработанных российскими и зарубежными учеными, в том числе формулы А.И. Целикова, А.А. Королева и других ученых. Эти формулы получены при решении дифференциального уравнения контактных давлений, который действуют на валки или полосы в зоне контакта.

### Методика А.И. Целикова

На рисунке 1.5 дана блок-схема методики А.И. Целикова расчета усилия при холодной прокатке. Основными особенностями расчета усилия при холодной прокатке являются обязательный учет наклепа металла и упругого сжатия валков, а во многих случаях и полосы.

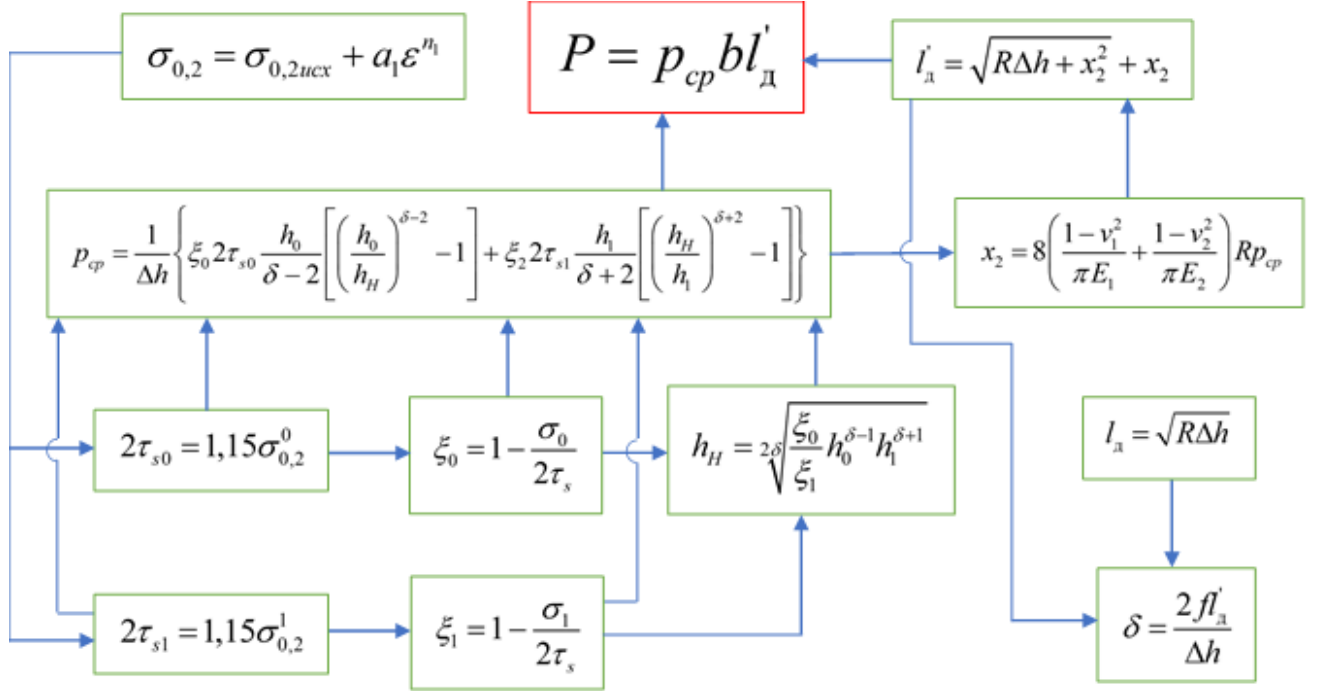


Рисунок 1.5 – Блок-схема расчета усилия при холодной прокатке по методике А.И. Целикова [13]

где:  $\sigma_0, \sigma_1$  – заднее и переднее натяжение, МПа;  $\xi_0, \xi_1$  – коэффициенты натяжения;  $h_0, h_1$  – толщина полосы на входе и выходе, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм;  $h_\gamma$  – толщина полосы в нейтральном сечении, мм;  $l_d$  – длина дуги захвата, мм;  $p_{cp}$  – среднее контактное нормальное напряжение (давление), МПа;  $P$  – сила прокатки, кН;  $R$  – радиус валки, мм;  $\sigma_{0,2}^0, \sigma_{0,2}^1$  – предел текучести металла до и после прокатки, МПа;  $\tau_s$  – сопротивление чистому сдвигу, МПа;  $\tau_{s0}, \tau_{s2}$  – сопротивления чистому сдвигу до и после прокатки, МПа;  $E_1, E_2$  – модуль упругости металла до и после деформации;  $v_1, v_2$  – скорость входа и выхода полосы в валки и из валков, м/с.

Коэффициент трения учитывали по формуле А.П. Грудева [51]:

$$f = k_{cm} \frac{1 + (0,4 + 0,01\varepsilon) R_z}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005v_{50}} \left[ 0,07 - \frac{0,1v_1^2}{2(1+v_1) + 3v_1^2} \right], \quad (1.14)$$

где:  $k_{см}$  – коэффициент, учитывающий природу смазки (для растительных масел  $k_{см}=1$ , для минеральных  $k_{см}=1,4$ );  $\nu_{50}$  – кинематическая вязкость масла при  $50^0C$  ( $м^2 / с \cdot 10^{-2}$ );  $\nu_1$  – окружная скорость валков, (м/с);  $R_z$  – шероховатость поверхности валка, (мкм);  $\varepsilon$  – относительное обжатие полосы, %.

### Методика А.А. Королева

В работе [13] приведен метод для расчета усилия А.А. Королева при холодной прокатке с коэффициентом контактного трения, который имеет небольшую величину  $f = 0,04 - 0,1$ .

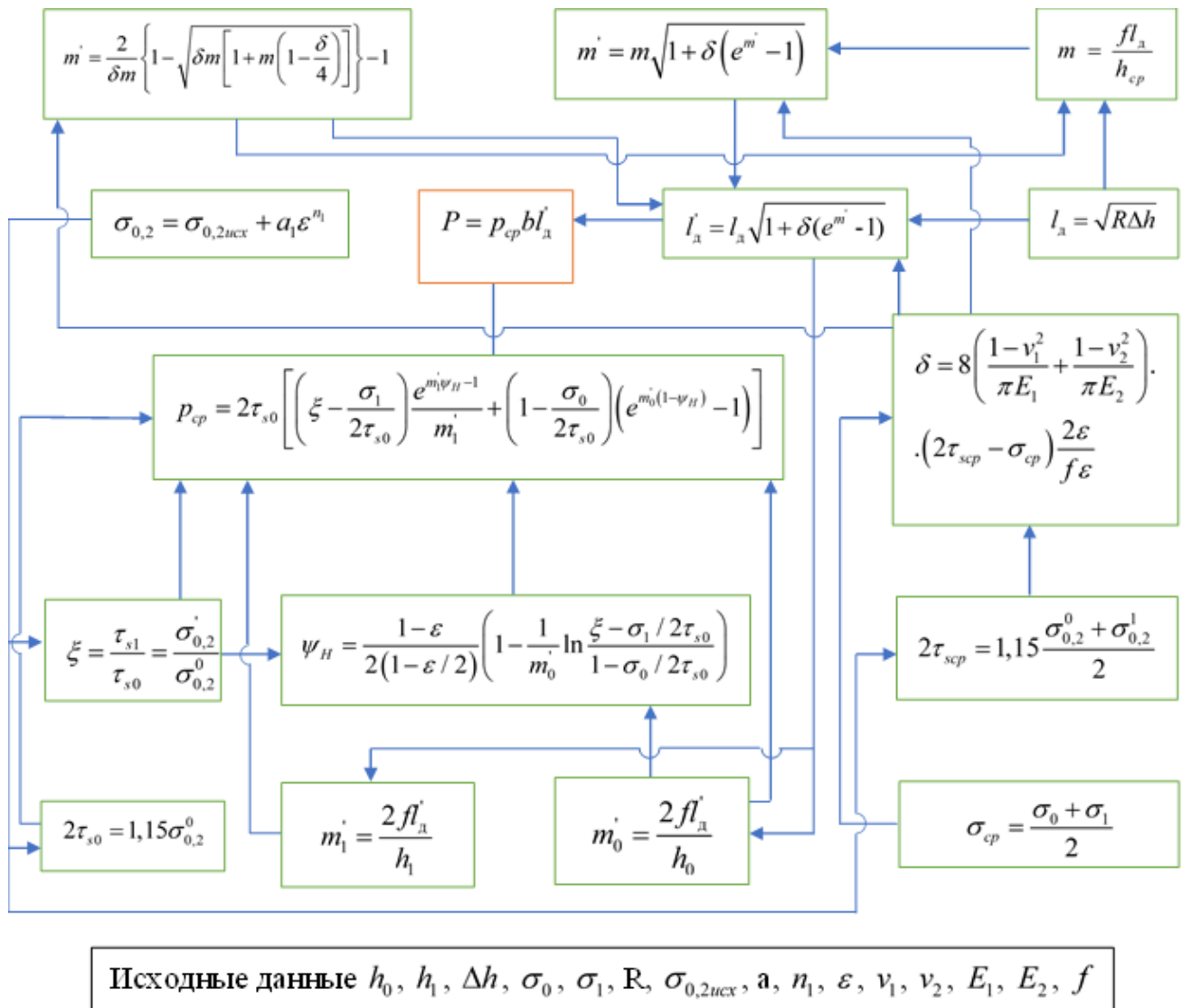


Рисунок 1.6 – Блок-схема расчета усилия при холодной прокатке по методике А.А. Королева [13]

где:  $m$  – чистота случаев;  $\sigma_{cp}$  – средний предел текучести, МПа;  $\tau_{scp}$  – среднее сопротивление чистому сдвигу, МПа;  $\psi_H$  – коэффициент плеча момента в нейтральном сечении.

По методу А.А. Королева учитывали упрочнение металла в очаге деформации через коэффициент упрочнения  $\xi$ . Для случаев, когда полосу прокатывают с примерно равными межклетьевыми натяжениями ( $\sigma_0 = \sigma_1$ ), уравнение расчета усилия упрощается

$$p_{cp} = \frac{2\tau_{s0}(e^{m'} - 1)}{m'} \left[ \left( \xi - \frac{\sigma_1}{2\tau_{s0}} \right) (1 - \varepsilon) + \left( 1 - \frac{\sigma_0}{2\tau_{s0}} \right) \right], \quad (1.15)$$

В этом уравнении сохранены обозначения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$ , поскольку заднее удельное натяжение в большей мере снижает  $p_{cp}$ , чем переднее.

### Методика Е. С. Рокотяна

Для определения силы прокатки по методу Е.С. Рокотяна нужно обращать следующее внимание:

- предел текучести металла при холодной прокатке изменяется по закону прямой линии;
- толщина полосы в очаге деформации  $h_{cp} = (h_0 + h_1) / 2$ .
- коэффициент  $\psi_d$  учитывали по формуле:  $\psi_d = fl_d / h_{cp}$ .

В рассматриваемой методике нет специальных указаний о расчете деформированной дуги захвата и коэффициента трения. Однако в работах [10, 13] представлен расчет  $l'_d$ . Для пользования номограммой необходимо определять три коэффициента по довольно сложным зависимостям. Проще использовать уравнения ( $l'_d = \sqrt{R\Delta h + x_2^2} + x_2$ ;  $x_2 = 8 \left( \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right) R p_{cp}$ ).

Широко известны данные Е.С. Рокотяна по коэффициенту трения при холодной прокатке стали 10кп в слабошлифованных валках из хромистой стали:



без смазки  $f = 0,16 - 0,24$ ; при смазке керосином  $f = 0,12 - 0,14$ ; при смазке минеральным маслом  $f = 0,08 - 0,1$ .

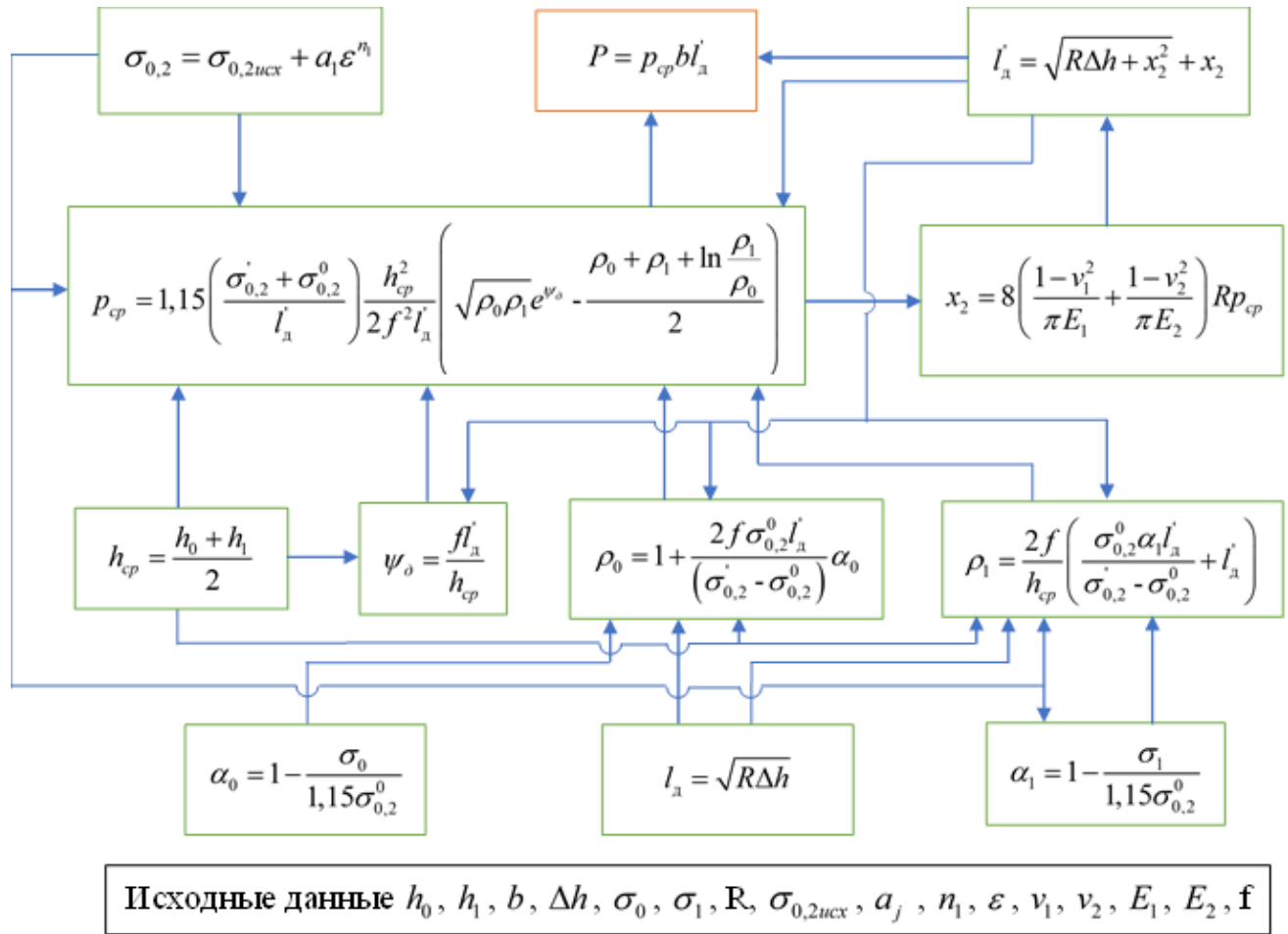


Рисунок 1.7 – Блок-схема расчета усилия при холодной прокатке по методике Е. С. Рокотяна [13]

где:  $\rho_0, \rho_1$  – плотности до и после прокатки,  $T / \text{м}^3$ ;  $\alpha_0, \alpha_1$  – коэффициенты теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

### Методика М.Д. Стоуна

Определяющим параметром в методике М.Д. Стоуна является отношение  $f l'_a / h_{cp}$ . Для этого находят отношение  $f l'_a / h_{cp}$  задавшись значениями отношений  $f l'_a / h_{cp}$  и  $2 \alpha f (2 \tau_{scr} - \sigma_{cp}) / h_{cp}$ , где  $\alpha = 8(1 - v^2)R / (\pi E)$ . На номограмме точки,

соответствующие найденным значениям  $(fl_d / h_{cp})^2$  и  $2\alpha f(2\tau_{ср} - \sigma_{ср}) / h_{ср}$ , соединяют прямой линией. Пересечение прямой линии со средней шкалой дает значение параметра  $fl_d / h_{ср}$ . Если средняя шкала пересекается в двух точках, то выбирают меньшее значение  $fl_d / h_{ср}$  (в противном случае рабочий валок деформируется больше, чем прокатанный металл).

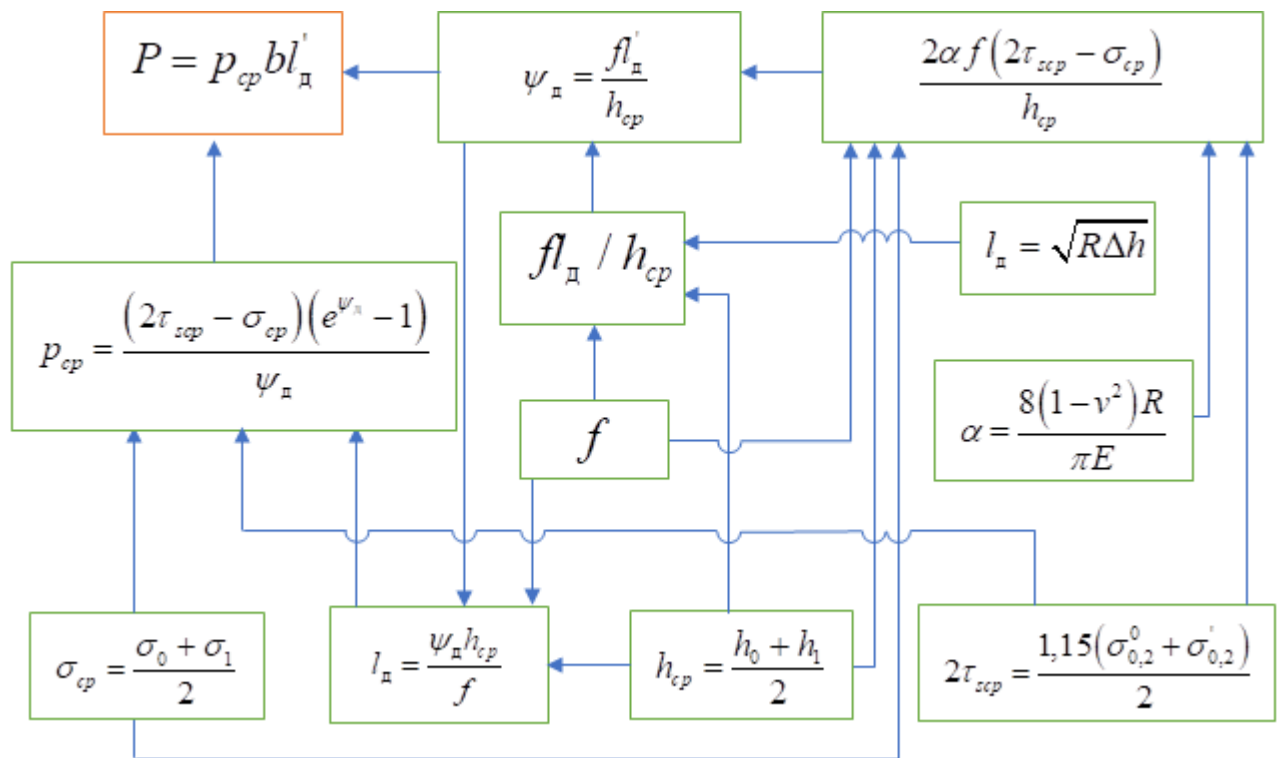


Рисунок 1.8 – Блок-схема расчета усилия при холодной прокатке по методике М.Д. Стоуна

### Методика А.В. Третьякова – Б.Е. Локшина

Достоинством методики А. В. Третьякова – Б. Е. Локшина заключается в том, что усилие и работу прокатки определяют в процессе единого энергосилового расчета. Блок-схема методики А. В. Третьякова – Б. Е. Локшина расчета усилия при холодной прокатке приведена на рисунке 1.9.

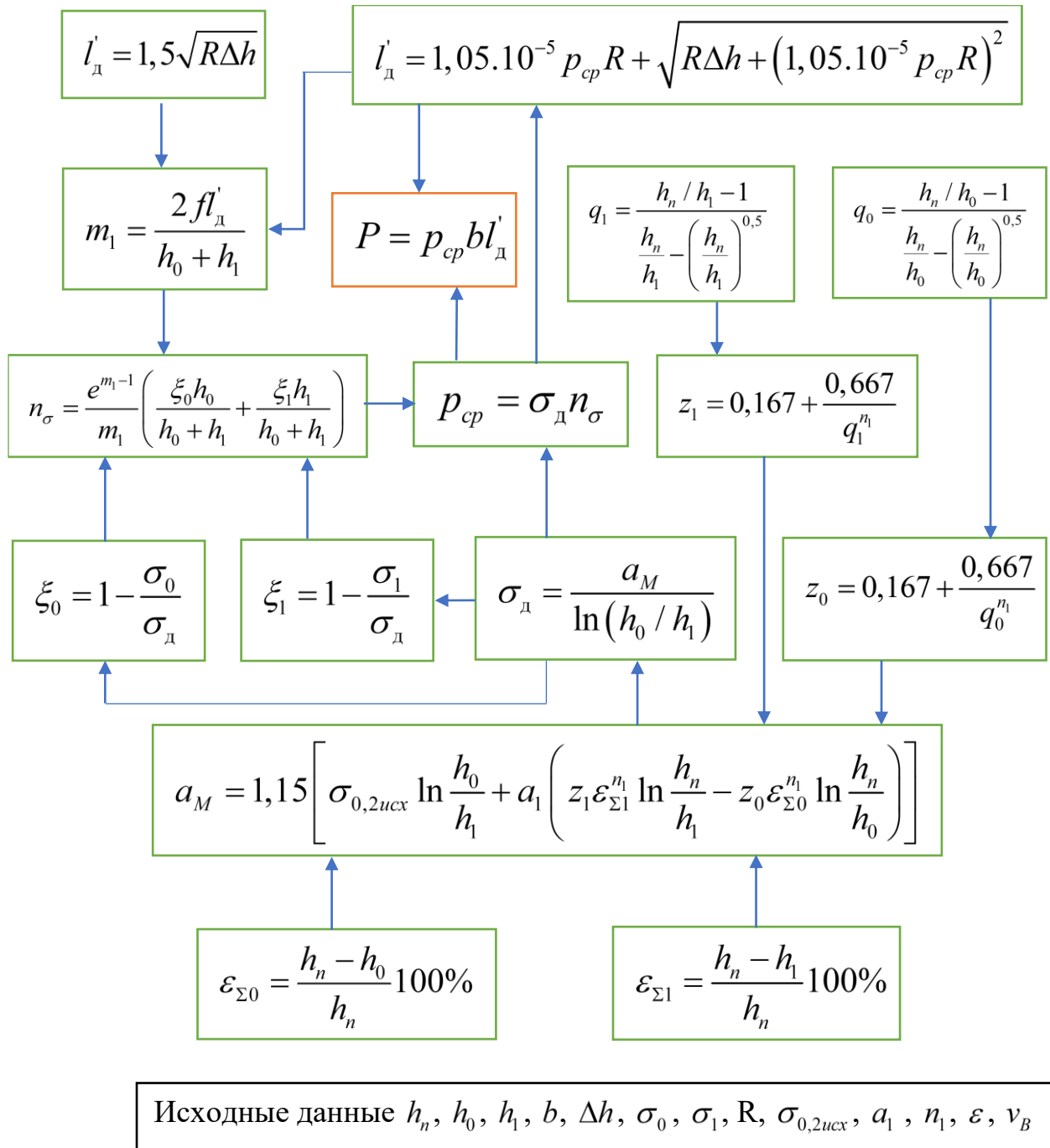


Рисунок 1.9 – Блок-схема расчета усилия при холодной прокатке по методике А.В. Третьякова – Б.Е. Локшина

В приведенных формулах, кроме обычных, приняты следующие обозначения:  $\sigma_d$  – среднее сопротивление металла пластической деформации, МПа;  $a_M$  – энергетический эквивалент сопротивления металла пластической

деформации за данный проход в данной клетке;  $h_n$  – толщина подката, мм;  $z_0, z_1, q_0, q_1$  – коэффициенты, определяемые по соответствующим формулам;  $\varepsilon_{\Sigma 0}, \varepsilon_{\Sigma 1}$  – суммарные относительные обжатия до и после рассматриваемого прохода, %;  $l'_{d1}$  – приближенное значение сплюсненной дуги захвата, мм.

Сплюсненную дуги захвата определяют методом итерации. Расчет прекращают при выполнении условия  $0,97 \leq l_d^{n+1} / l_d^n \leq 1,03$ .

### *Анализ методик расчета усилия прокатки.*

Наличие большого числа методик для расчета усилия прокатки делает естественным сравнение результатов расчетов по ним с экспериментальными данными. Особенно много работ, в которых приведены результаты такого сравнения, опубликовано от 60-х годов до настоящего времени [52, 53].

В работе [13] авторы выполнили сравнение методов расчета усилия прокатки С. Экелунда, Е. Зибеля, В. Тринкса, Е. Орована, Ш. Гелеи, А.И. Целикова. Сделан вывод, что для условий прокатки толстолистовой стали наилучшие результаты из рассмотренных методов дают методы Е. Зибеля и С. Экелунда, для тонколистовой – методы Е. Зибеля, С. Экелунда, А.И. Целикова.

З. Вусатовский с использованием экспериментальных данных В.А. Тягунова, полученных для условий прокатки листа размерами 7х1400х9000 мм (на стане трио-Лаута) и тонколистовой стали 2х685х1400 мм и 0,35х750х1640 мм на линейном двухвалковом стане), сравнил с расчетными данными, полученными по формуле А.И. Целикова, С.И. Губкина, А.Ф. Головина – В.А. Тягунова, А.Ф. Головина – В.В. Швейкина. Выявлено, что для условий прокатки листа толщиной 7мм методика Е. Зибеля дает завышенные, а А.И. Целикова заниженные результаты с большим отклонением от экспериментальных значений. Наилучшие результаты получены по формулам С. Экелунда и А.Ф. Головина – В.А. Тягунова. Последняя из этих двух методик наилучшая и для случая прокатки полосы толщиной 0,35мм. Для полосы толщиной 2 мм наилучшие методики А.И. Целикова и С. Экелунда.

В работе [53] дано сравнение расчетных данных по формулам С. Экелунда, А.И. Целикова, В. Тринкса, Р.Б. Симса, Е. Орована, Д. Едлички с экспериментальными данными, полученными на двухвалковом толстолистовом прокатном стане 950. Получены следующие результаты. В первых шести проходах при  $R/h_1 = 3 \div 5,3$  расчетные значения по всем формулам ниже экспериментальных, наиболее близки к ним результаты, полученные по формулам С. Экелунда и Д. Тринкса. При 9 – 15 проходах и  $R/h_1 = 6,8 \div 24$  наилучшее совпадение с экспериментальными данными дают формулы А.И. Целикова и С. Экелунда. Указано, что хорошее соответствие результатов расчета получается по формулам Р.Б. Симса и В. Тринкса при  $\varepsilon \geq 0,15$ . При малых обжатиях  $\varepsilon \leq 0,15$ , имеющих место в последних проходах, расчетные значения усилия прокатки по всем методикам значительно меньше экспериментальных.

Для холодной прокатки в работах [52, 53] также приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по усилию прокатки. В частности указано, что при расчете по формуле А.И. Целикова отклонения расчетных значений от экспериментальных находятся в диапазоне от  $-30$  до  $+30\%$ , а по формуле Д.Р. Бленда и Х. Форда – от  $+20$  до  $+30\%$ .

На основании представленных многими авторами, а также данных, которые получены авторами данного справочника можно отметить, что даже при прокатке одного раската в различных проходах одного листового стана нельзя безоговорочно отдать предпочтение одной какой-либо методике расчета усилия прокатки.

В представленных выше примерах расчетов, выполненных нами для одних и тех же условий прокатки, также получены существенно разнящиеся результаты. Это происходит по следующим (в порядке степени влияния) причинам:

- погрешность определения экспериментальных данных (как непосредственно усилия прокатки, так и параметров, входящих в расчетную формулу – температура, скорость прокатки, режим обжатий и т.п.);

- недостаточная точность методики расчета;
- 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, сопротивления деформации, скорость деформации, коэффициент трения и т.п.) принимаются произвольно.

### **1.3. Влияние технологических смазок на контактное напряжение при холодной прокатке тонких полос.**

В работе [54] экспериментальные исследования влияния технологических смазываний на контактное давление и силы прокатки были выполнены на высокоскоростном стане 300. В этой работе при холодной прокатке лент из отожженной низкоуглеродистой стали Ст2кп (толщина 1,95мм и ширина 50мм) с относительным обжатием 15% исследовали влияние технологических смазываний из синтетических жирных спиртов  $C_{17}-C_{20}$  (СЖС) на величину нормального контактного давления в очаге деформации. Для приготовления водных эмульсий непосредственно из спиртов необходим эмульгатор, то его вводили в небольшом количестве от 1 до 4% в опытную смазку ЭК-7. В этом случае получены четыре опытные эмульсии на основе смазки ЭК-7 с добавкой соответственно 1% СЖС (ЭК-7СЖС1), 2% (ЭК-7СЖС2), 3% СЖС (ЭК-7СЖС3) и 4% СЖС (ЭК-7СЖС4).

Из полученных результатов на рисунке 1.10 показано, что при скорости прокатки 4,5 м/с добавка 1% СЖС снижает величину нормальных контактных давлений на 100 МПа по сравнению со смазкой ЭК-7 без СЖС. Примерно такая же разница получена и при содержании в эмульсии 2 и 3% СЖС. Несколько меньшее снижение исследуемого параметра, соответствующее 50 МПа, отмечено при прокатке полос со смазкой ЭК-7СЖС4.

При прокатке со скоростью 9,5м/с наблюдается такая же закономерность, то есть наибольшее снижение нормальных контактных давлений получено при

содержании 1% СЖС, такой же эффект показали технологические смазки ЭК-7СЖС2 и ЭК-7СЖС3, в то время как смазка ЭК-7СЖС4 опять оказалась менее эффективной. Более заметное влияние 1%-ной добавки СЖС имело место при скорости прокатки 15,7м/с, при этом случае было отмечена наименьшая величина нормальных контактных давлений, соответствующая порядка 350 МПа.

При содержании 2% и 3% синтетических жирных спиртов в смазке ЭК-7 величина нормальных контактных давлений постепенно возрастает и составляет 400 МПа и 450 МПа, соответственно. Опытная смазка ЭК-7, содержащая 4% СЖС, при прокатке полос со скоростью 15,7м/с, показала почти одинаковые свойства со смазкой ЭК-7СЖС2. В случае максимальной скорости прокатки 30,1м/с также установлено положительное влияние СЖС, поскольку наблюдается заметное снижение энергосиловых параметров исследуемого процесса.

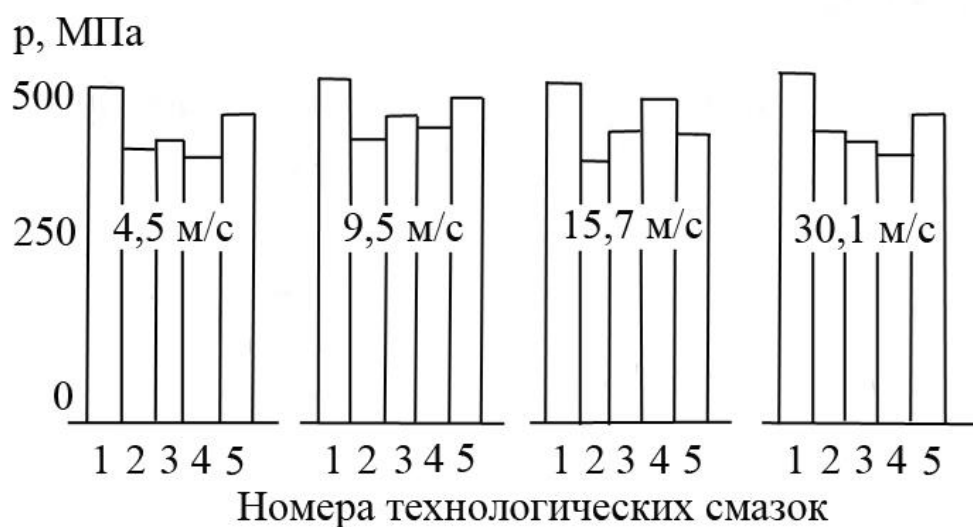


Рисунок 1.10 – Распределения нормальных контактных давлений при холодной прокатке на стане 300 лент из стали Ст2кп с различными технологическими смазками: 1 – ЭК-7; 2 – ЭК-7СЖС1; 3 – ЭК-7СЖС2; 4 – ЭК-7СЖС3; 5 – ЭК-7СЖС4.

Обобщая результаты выполненных экспериментальных исследований, необходимо указать на высокую эффективность опытных смазок при холодной прокатке, достигнутой благодаря гидродинамическому эффекту и физико-

химическим свойствам. Менее эффективной по сравнению с другими оказалась смазка ЭК-7СЖС4, что позволяет сделать вывод о наличии рационального значения присадки СЖС к смазке ЭК-7 в количестве, составляющем порядка 1...3(%). Опытные эмульсии, содержащие СЖС, показали хорошую смачиваемость поверхности стальных образцов. Такие эмульсии имеют улучшенные моющие свойства, что также важно для современных технологических смазок и моюще-охлаждающих жидкостей. Несмотря на то, что синтетические жирные спирты имеют сравнительно высокую стоимость, все же добавка их к смазкам в ряде случаев может быть оправдана и вполне целесообразна как при обычной, так и при тонколистовой холодной прокатке [54].

#### **1.4. Сопротивление металла деформации и зависимость его от степени пластической деформации при холодной прокатке тонких полос.**

Для расчета показателей процесса холодной прокатки широко использовали основные механические свойства металла: временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$ , твердость (по Бринеллю) НВ и (по Виккерсу) НV.

Испытание на растяжение для определения временного сопротивления  $\sigma_{\text{в}}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$  образцов металлов и их сплавов проводится в соответствии с ГОСТом 1497 – 84.

В работах [55, 56] представлен график изменения напряжения  $\sigma$  (МПа) металла по степени  $\varepsilon$  (%) деформации при растяжении и сжатии (рисунок 1.11).

ОАВ – область упругих деформаций.

ВС – область пластических деформаций.

CD – с увеличением нагрузки удлинение быстро начинает возрастать.

ЕК – разрушение образца.



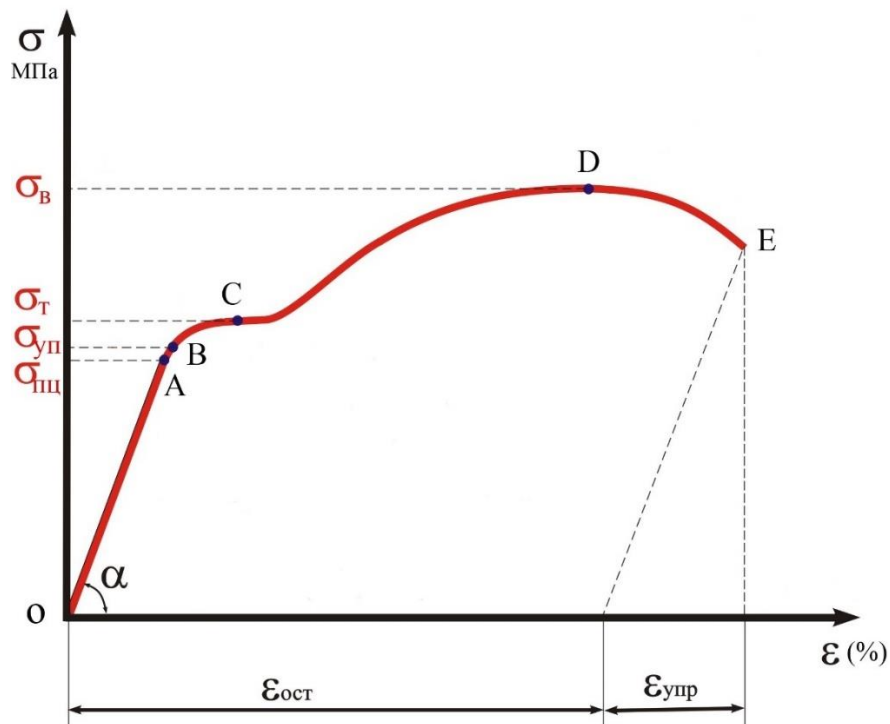


Рисунок 1.11 – Кривой изменения напряжения  $\sigma$  металла по степени деформации  $\varepsilon$  при растяжении и сжатии

- $\sigma_{пл}$  – предел пропорциональности (граница действия закона Гука).
- $\sigma_{уп}$  – условный предел упругости (граница упругих деформаций).
- $\sigma_T$  ( $\sigma_s$ ) – предел текучести металла, это наименьшее напряжение образца, который деформируется без заметного увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = P / F_0, \text{ (кГ/мм}^2\text{)} \quad (1.16)$$

где:  $P$  – Сила, которая в соответствии с этим напряжением, (кГ);  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, (мм<sup>2</sup>).

- $\sigma_{0,2}$  – предел текучести – это напряжение образца, которое получилось при  $\delta = 0,2\%$  :

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0, \text{ (кГ/мм}^2\text{)} \quad (1.17)$$

где:  $P_{0,2}$  – нагрузка, соответствующая этому напряжению, (кГ).

- $\sigma_B$  – временное сопротивление.

$$\sigma_B = P_{max} / F_0, \text{ (кГ/мм}^2\text{)} \quad (1.18)$$

где:  $P_{max}$  – максимальная нагрузка.

Показано, что при холодной прокатке изменение механических свойств (предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения и твердость) зависит от степени деформации образца [57 – 61].

Показана зависимость предела текучести  $\sigma_s$  ( $\sigma_T$ ) меди МЗ, латуней Л63 и ЛС59-1 от их степени деформации при холодной прокатке на рисунке 1.12.

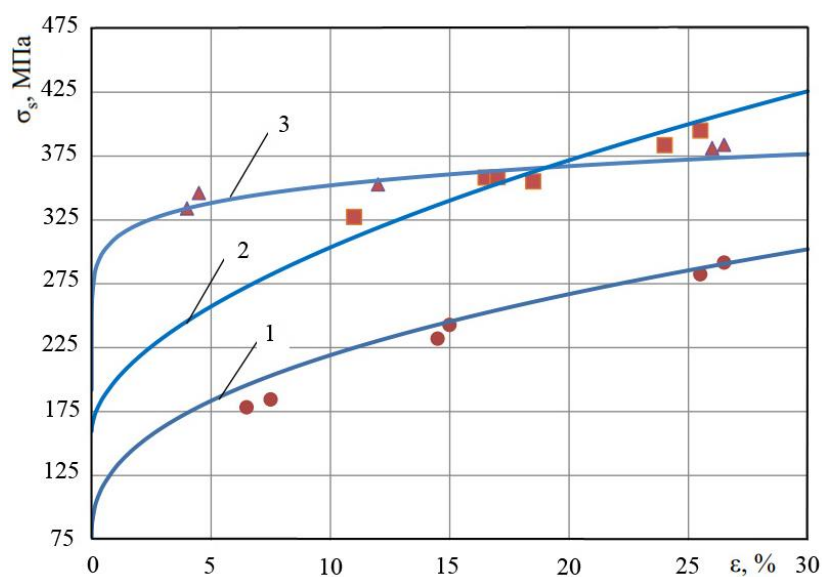


Рисунок 1.12 – Кривые изменения предела текучести  $\sigma_s$  в зависимости от степени деформации при холодной прокатке: 1 – медный (МЗ) сплав; 2 – Латунь Л63; 3 – Латунь ЛС59-1. [57]

В работах [62 – 69] представлены результаты исследования известных ученых – А.В. Третьякова, В.И. Зюзин и других о зависимостях механических свойств медных сплав от относительного обжатия полосы при холодной прокатке. На рисунке 1.13 показаны кривые, которые указали зависимости предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временного сопротивления  $\sigma_b$ , относительного удлинения  $\delta$  и твердости НВ образцов из меди М1 и М4 от степени деформации  $\varepsilon$ .

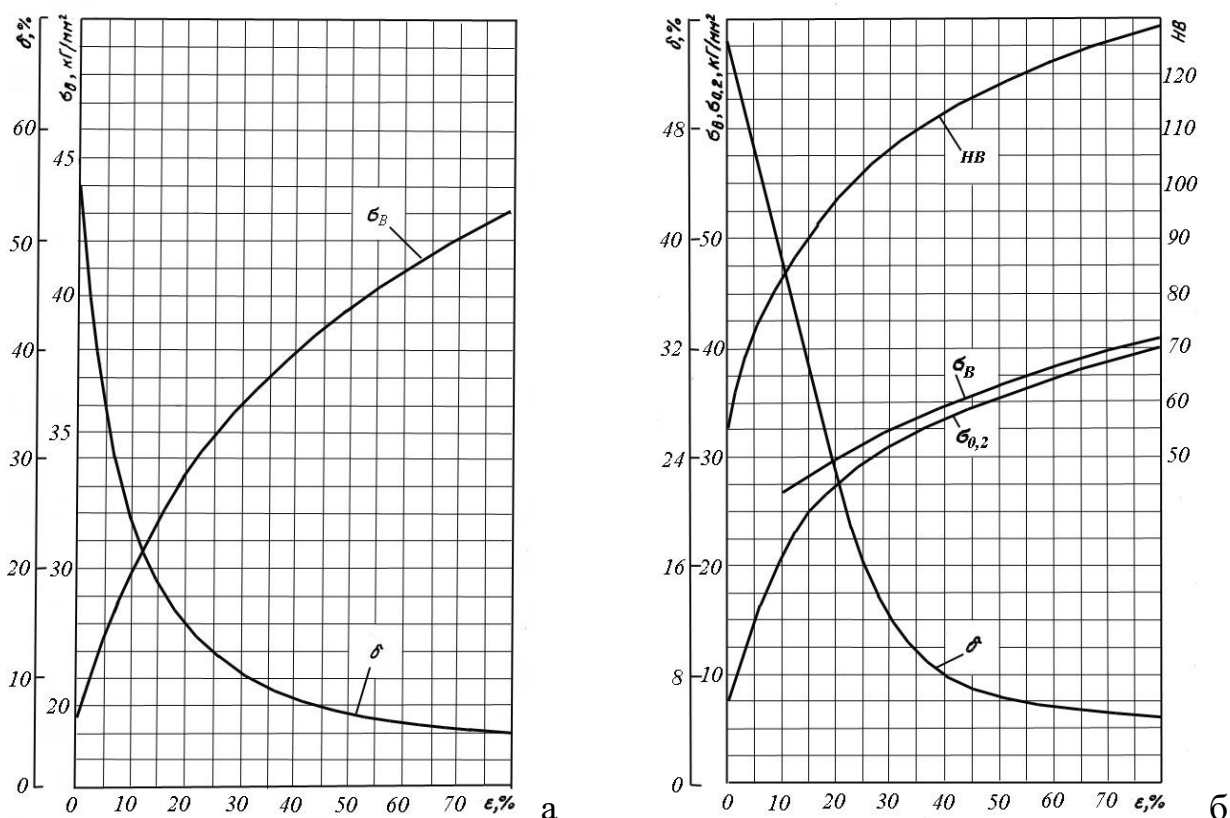


Рисунок 1.13 – Кривой изменения механических свойств медных сплавов в зависимости от степени деформации при холодной прокатке: а – медного сплава М1; б – медного сплава М4 [58]

### 1.5. Взаимосвязь между различными показателями механических свойств металла при холодной прокатке.

Исследования Третьякова А.В, Золоторевского В.С, Осинцева О.Е и других авторов показали, что существует множество методов определения механических свойств, а также твердости в процессе обработки металлов давлением [70 – 86]. Традиционный метод заключается проведение испытаний образцов на разрыв с измерением сил и деформаций для определения механических показателей металлов на модифицированных приборах, например: ПМТ-2, ПМТ-3 и другие [74, 75]. Этот метод имеет то преимущество, что дает основные результаты, близкие к истинным механическим свойствам металла после обработки

давлением [76, 77]. Однако вышеприведенный метод имеет несколько недостатков: большой объем материальных и трудовых затрат; достоверность полученных результатов зависит от точности лабораторного оборудования; нужны дополнительные расходы и трудозатраты, чтобы утилизировать разрушение образцы после испытания [79].

В работах [70, 71, 81 – 83] были проведены исследования для построения взаимосвязей между такими факторами, как механические свойства, твердость и деформационные показатели, чтобы иметь возможность быстро рассчитать эти показатели после определения одного из них. Результаты исследований указывают, что этот подход преодолевает указанные выше недостатки разрушающих методов контроля свойств дает результаты расчетов с высокой надежностью и точностью.

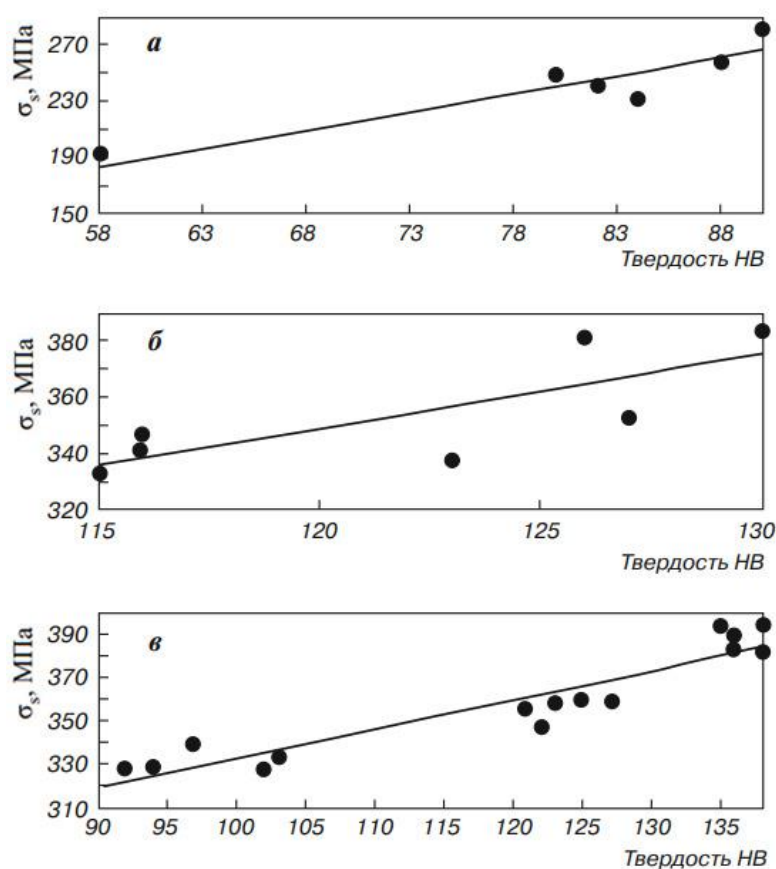


Рисунок 1.14 – Зависимость предела текучести  $\sigma_s$  от твердости по Бринеллю НВ при холодной прокатке: а – меди М3; б – латуни ЛС59-1; в – латуни Л63.

В работе [57] представлены графики, которые показали связи пределов текучести  $\sigma_s$  и твердости по Бринеллю НВ медного (МЗ) сплава, латуни Л63 и ЛС59-1 при холодной прокатке (рисунок 1.14).

Эмпирические уравнения для расчета предела текучести  $\sigma_s$  по твердости НВ медного (МЗ) сплава, латуни Л63 и ЛС59-1 имеют виды:

$$\text{- Меди МЗ: } \sigma_s = 2,609HB + 31,73, \quad R^2 = 0,884, \quad (1.19)$$

$$\text{- Латуни ЛС59-1: } \sigma_s = 2,572HB + 39,33, \quad R^2 = 0,696, \quad (1.20)$$

$$\text{- Латуни Л63: } \sigma_s = 1,355HB + 197, \quad R^2 = 0,880, \quad (1.21)$$

где:  $R^2$  – коэффициент корреляции.

В настоящем исследовании значения твердости и прочности для медных сплавов были собраны из литературы. Для сравнения, несколько значений твердости были преобразованы из НВ и HRB в Твердость по Виккерсу согласно ASTM E140-07 [82]. Все собранные значения твердости и прочности были разделены на основе потенциала деформационного упрочнения как низкие, средние и высокие отношения  $\sigma_b / \sigma_s$ . Регрессионный анализ наименьших квадратов был использован для получения простых выражений, чтобы предсказать прочность по твердости.

В дополнение к литературным значениям, твердость и прочность были оценены для некоторых медных сплавов для подтверждения получены эмпирические соотношения. Измерения проводились в различных условиях термической обработки, холодной и горячей обработки. Образцы на твердость перед измерением твердости шлифовали и полировали наждачной бумагой. Для каждого условия было взято семь показаний, и сообщается среднее значение. Твердость измерялась с помощью твердомера Виккерса (марка: FIE FE-20) с нагрузкой 10 кгс. Свойства при растяжении оценивали с помощью плоских образцов при растяжении в форме собачьей кости (длина калибра 25 мм) с использованием INSTRON 5500R UTM при скорости деформации  $10^{-3}(1/c)$ . Древовидные тесты были выполняются для каждого условия и сообщается среднее

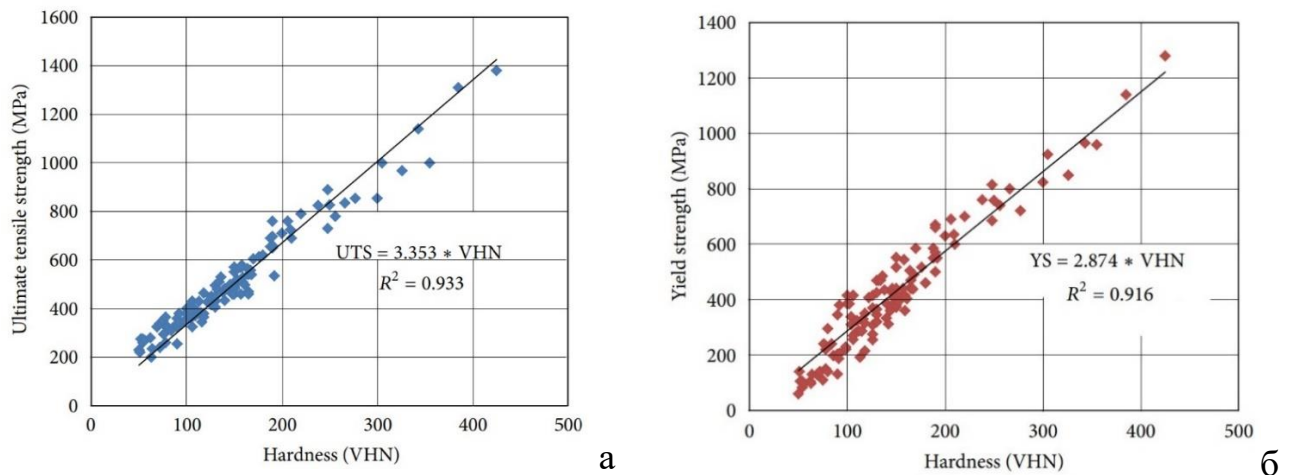


Рисунок 1.15 – Зависимость временного сопротивления  $\sigma_B$  (а) и предела текучести  $\sigma_s$  (б) от твердости медного сплава.

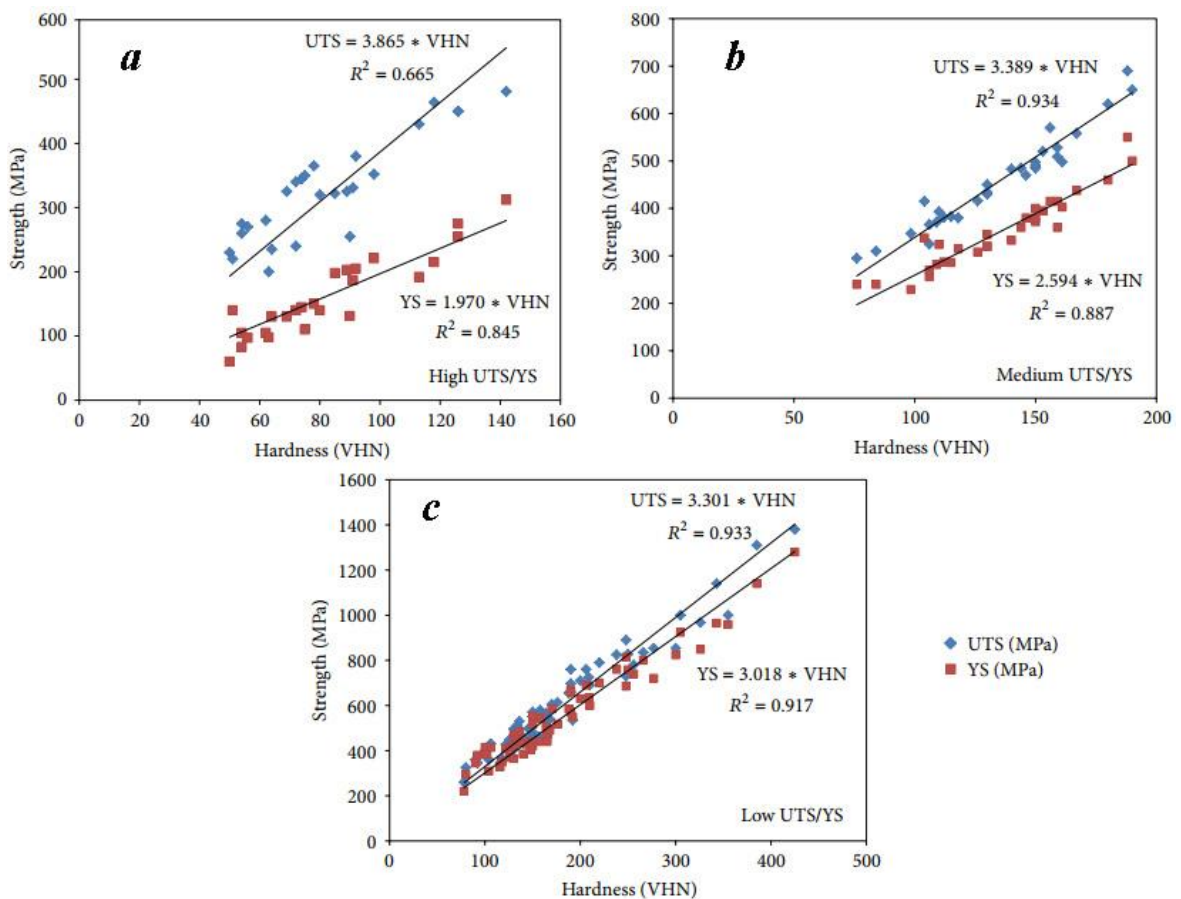


Рисунок 1.16 – Зависимость предела текучести  $\sigma_s$  (YS) и временного сопротивления  $\sigma_B$  (UTS) от твердости по Виккерсу (VHN) различных медных сплавов: а – высокое отношение  $\sigma_B / \sigma_s$ ; б – среднее отношение  $\sigma_B / \sigma_s$ ; в – низкое отношение  $\sigma_B / \sigma_s$ .

значение. Результаты (графики и эмпирические уравнения) исследования приведены на рисунках 1.15 и 1.16.

Видно, что все анализируемые данные могут быть смоделированы с помощью линейных уравнений. Однако во всех случаях наблюдалось некоторое отклонение от линейной линии тренда, как показано на рисунках 1.14 – 1.16. Это можно объяснить тем, что в настоящей работе был проанализирован широкий спектр медных сплавов с различной термомеханической и термической историей. Кроме того, это может быть связано с тем, что измерение твердости производится на образцах с различной шероховатость поверхности с использованием различной нагрузки на вдавливание, так как и то, и другое влияет на измеряемую твердость.

В таблице 1.1 приведены эмпирические уравнения, которые показали зависимости механических показателей меди и ее сплав: предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$ , относительного удлинения  $\delta$  и твердости по Бринеллю HB от степени деформации при холодной прокатке.

Таблица 1.1 – Зависимость механических показателей меди и ее сплав: предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$ , относительного удлинения  $\delta$  и твердости по Бринеллю от степени деформации  $\varepsilon$  при холодной прокатке [57, 58]

Сплав	Эмпирические уравнения
Медь М1	$\sigma_B = 25 + 1,5\varepsilon^{0,58}$ ,
Медь М3	$\sigma_{0,2} = 7,7 + 5,4\varepsilon^{0,42}$
Медь М4	$\sigma_{0,2} = 7,5 + 5,6\varepsilon^{0,41}$ , $\sigma_B = 23 + 0,8\varepsilon^{0,72}$ , $HB = 55 + 11\varepsilon^{0,44}$
Латунь Л96	$\sigma_B = 27,5 + 1,4\varepsilon^{0,68}$ , $HB = 45 + 8,1\varepsilon^{0,56}$
Латунь Л90	$\sigma_{0,2} = 23 + 2,9\varepsilon^{0,52}$ , $\sigma_B = 31 + 1,3\varepsilon^{0,65}$ , $\lg \delta = 1,538 - 1,92\varepsilon + 1,2\varepsilon^2$ , $HB = 97 + 2,6\varepsilon^{0,72}$

Латунь Л80	$\sigma_{0,2} = 10 + 3\varepsilon^{0,7}, \sigma_B = 29 + 1,3\varepsilon^{0,83}$
Латунь 75	$\sigma_B = 30 + 1,3\varepsilon^{0,79}, \lg \delta = 1,681 - 2,97\varepsilon + 2,3\varepsilon^2$
Латунь 70	$\sigma_{0,2} = 12 + 2\varepsilon^{0,78}, \sigma_B = 32,5 + 0,57\varepsilon^{0,98},$ $HB = 74 + 7,8\varepsilon^{0,62}$
Латунь 68	$\sigma_{0,2} = 12 + 3,6\varepsilon^{0,62}, \sigma_B = 32,5 + 1,1\varepsilon^{0,8},$ $\lg \delta = 1,845 - 1,35\varepsilon - 0,41\varepsilon^2, HB = 70 + 6,8\varepsilon^{0,72}$
Латунь 63	$\sigma_{0,2} = 15,9 + 3,9\varepsilon^{0,56}$
Латунь 59-1	$\sigma_{0,2} = 19,2 + 11,9\varepsilon^{0,13}$
Бронза Бр.АМц9-2	$\sigma_B = 49,5 + 0,62\varepsilon, \lg \delta = 1,748 - 4,17\varepsilon + 2,9\varepsilon^2$
Бронза Бр.АЖ9-4	$\sigma_B = 59 + 2,8\varepsilon^{0,72}, \lg \delta = 1,568 - 2,89\varepsilon + 2,2\varepsilon^2$



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

1. Представлены методики, уравнения и схемы для расчета давления и силы прокатки по результатам исследований А.И. Целикова, М.Д. Стоуна, Е.С. Рокотяна и других ученых. В теоретических и экспериментальных исследованиях показано, что при сравнении расчетных результатов, выполненных по этим методикам и формулам с измеренными величинами ошибки составляют от -30 до +30%, особенно в установившийся период прокатки тонких полос.

2. Установлено, что применение технологических смазок позволяет уменьшить силу прокатки и снизить энергосиловые параметры исследуемого процесса. Интенсивность влияния технологических смазок на показатели процесса холодной прокатки зависит от их химического состава, физического свойства и скорости прокатки. Однако, изменение коэффициента и сил трения, в частности за счет изменения технологических смазок влияет на силу прокатки и формирование размеров по длине полос, что недостаточно исследовано.

3. Изменение механических свойства большинства металлов и их сплавов при горячей и холодной деформации достаточно хорошо изучено и приведено в работах различных авторов. Однако в большинстве источников приведены данные по изменению предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от степени деформации, но результаты исследования еще не обеспечивают полностью для всех. В том, что механические свойства медного сплава М0 изучены недостаточно. Не приведены кривые и уравнения для расчета механических свойств этого сплава конкретного химического состава.

4. Исследования известных авторов в литературах показали, что существует множество методов определения механических свойств, а также твердости в процессе холодной прокатки тонких полос и лент. Традиционный метод имеет то преимущество, что дает основные результаты, близкие к истинным механическим свойствам металла после обработки давлением, а также имеет несколько недостатков: большой объем материальных и трудовых затрат; достоверность

полученных результатов зависит от точности лабораторного оборудования; нужны дополнительные расходы и трудозатраты, чтобы утилизировать разрушение образцы после испытания. Проведены исследования для построения взаимосвязей между такими факторами, как механические свойства, твердость и деформационные показатели, чтобы иметь возможность быстро рассчитать эти показатели после определения одного из них. Этот подход преодолевает указанные выше недостатки разрушающих методов контроля свойств и дает результаты расчетов с высокой надежностью и точностью.

**Цель работы.** Усовершенствование режимов прокатки с технологическими смазками для выравнивания толщины по длине медных лент и снижения энергосиловых показателей процесса.

**Задачи исследования:**

1. Анализ эффективности применяемых технологических смазок на листовых станах российских и вьетнамских заводов для улучшения качества полос и лент из цветных металлов и сплавов.
2. Экспериментальное исследование эффективности влияния различных технологических смазок на показатели процесса прокатки по длине тонких медных полос и лент.
3. Уточнение закономерностей изменения прочностных и пластических характеристик от степени деформации и зависимостей основных механических свойств от показателя твердости прокатанных полос из меди М0 известного химического состава.
4. Построение уравнений расчета сопротивления деформации и механических свойств меди М0, 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 новых режимов прокатки медных лент с технологическими смазками, обеспечивающих заданную толщину, сокращение времени на деформацию и снижение расходов на электроэнергию на стане 175х300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най во Вьетнаме.

## Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДИ М0 КОНКРЕТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОС.

### 2.1. Исследование химического состава и определение марки меди прокатываемых полос.

Для разработки и рационального проектирования режимов прокатки медных полос на стане требуется определение конкретного химического состава и марки меди, а также изменение механических свойств металла в процессе деформирования.

Определили конкретный химический состав деформированных медных образцов, полученных с машиностроительного завода в г. Донг Най (Вьетнам). Определение химического состава меди проводилось оптико-эмиссионным спектральным методом с использованием аналитического прибора PMI-MASTER.

Результаты химического анализа заготовок приведены в таблице 2.1. Анализ химического состава металла заготовок, полученных из Вьетнама, установил его соответствие меди марки М0 по ГОСТ 859 – 2014 «Медь. Марки» [87 – 89], которая соответствует обозначенного Cu – ЕТР по стандарту BSEN 1412: 1996. В российском стандарте массовая доля Cu должна быть не менее 99,93%.

Таблица 2.1 – Химический состав заготовок из медного сплава

Массовая доля элементов, %							
<b>Cu</b>	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>
99,95	<0,0001	0,003	<0,002	0,001	0,0003	0,0024	<0,0013
<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Cr</b>	<b>Zr</b>	<b>Cd</b>
0,0005	0,0002	0,001	0,004	<0,001	0,0004	<0,0001	<0,0002
<b>B</b>	<b>Mg</b>	<b>Be</b>	<b>Co</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>O</b>	
<0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0005	<0,001	<0,0002	0,035	

## 2.2. Обоснование режима отжига медных полос.

Отжиг выполнили в лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета.

Работы отжига обеспечивает облегчить механическую и пластическую обработку медных полос, снизить твердость меди М0 до выполнения процесса прокатки.

При термообработке сплава меди М0 учитывали следующие особенности металла: повышение теплопроводности и взаимодействие с газами при нагреве. Термообработка позволяет сделать сплав М0 более мягким и пластичным.

Режим отжига представлен в работе [90]. Технология отжига медных сплавов проходит несколько следующих шагов:

1. загрузка образцов из меди М0 в печь;
2. установка муфеля и продувание защитным газом для удаления воздуха;
3. нагрев образцов до 650 – 700<sup>0</sup>С;
4. быстрое охлаждение образцов до 100<sup>0</sup>С погружением их в воду;
5. придание требуемой формы;
6. второй раз нагрева образцов до 350 – 400<sup>0</sup>С;
7. медленное охлаждение образцов на воздухе от 1 до 2 часа и разгрузка.

Обработка заканчивается, когда температура отжига меди достигает величины, при которой она может находиться на воздухе без окисления. Выдавать заготовки на воздух с высокой температурой запрещено.

Предел текучести  $\sigma_{т0}$  сплава меди М0 после отжига уменьшается, равен 41 до 47 МПа (см. таблицу 2.2).

## 2.3. Методика эксперимента и результаты холодной прокатки тонких полос из медного (М0) сплава на лабораторном стане 150x235.

Процесс холодной прокатки меди М0 полос проводили на лабораторном двухвалковом стане 150×235, который имеет диаметр валков равен 141,6 мм [91], установленном в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского Политеха.

Изменение размеров по длине полос до и после прокатки осуществляли с точностью  $\pm 0,01$  мм электронным штангенциркулем.

На лабораторном двухвалковом стане оснащается микроконтроллерная система для измерения силы прокатки с шагом по времени 0,0125 с. Система контроля позволяет определять суммарное значение силы прокатки с точностью  $\pm 0,01$  кН, отображать значения на циферблатах приборов, передавать собранную информацию на вход персонального компьютера, а также формировать отчет о последовательности прокаток и распечатывать результаты измерений [92, 93].

Прокатку медных полос проводили с обжатиями  $\epsilon$  от 10 до 30% в сухих валках и с эмульсиями смазок: смазка прокатная СПЗ (6%), индустриальное масло И40 (5%), подсолнечное масло (Подс. масло) (5%) и пальмовое масло. По трем образца при прокатке с каждой технологической смазкой.

На рисунке 2.1 приведен лабораторный двухвалковый стан 150×235 с микроконтроллерной системой для измерения сил прокатки.



Рисунок 2.1 – Двухвалковой стан 120х235 с системой контроля сил прокатки кафедры «ОМД и АТ» Московского Политеха.

В процессе прокатки меди М0 полос измеряли экспериментальную силу прокатки  $P_p$  по длине трех участков полос: начало (н), середина (с) и конец (к) полосы.

#### **2.4. Определение механических свойств полос из меди М0 известного химического состава**

Изменение механических свойства большинства медных сплавов при горячей и холодной деформации достаточно хорошо изучено и приведено в работах [94 – 102]. Однако в большинстве источников приведены данные по изменению временного сопротивления и относительного удлинения от степени деформации, а кривые изменения предела текучести отсутствуют. Механические свойства медного сплава М0 изучены недостаточно. Не приведены кривые и уравнения для расчета механических свойств этого сплава конкретного химического состава [95, 96]. Определение изменения при прокатке механических свойств полос из медного сплава М0 известного химического состава позволяет повысить точность расчета деформационных и силовых параметров процесса листовой холодной прокатки. Наличие адекватных уравнений для расчета изменения показателей механических свойств от обжатия позволяет с использованием автоматизированных систем проектировать рациональные технологические режимы прокатки медных полос на промышленных станах.

В процессе холодной прокатки полос, листов и лент предел текучести металла  $\sigma_T$  зависит от относительного обжатия полосы на выходе валков и условий деформирования металла по следующей формуле [103]:

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

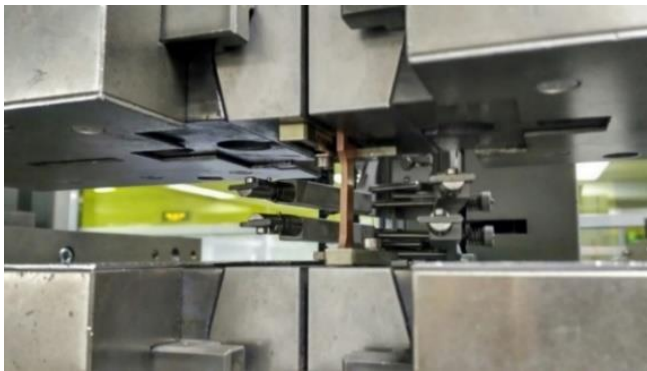
где: А, В – коэффициенты характеризуют начальное состояние металла; D – коэффициент упрочнения металла;  $\varepsilon$  – относительное обжатие, %.

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

В работе [103] представлена система уравнений для определения коэффициентов А, В и D, которая имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_{\tau 0} = A \\ \sigma_{\tau 1} = A + B\varepsilon_1^D \\ \sigma_{\tau 2} = A + B\varepsilon_2^D \\ \sigma_{\tau 3} = A + B\varepsilon_3^D \end{cases}, \quad (2.3)$$

где:  $\sigma_{\tau 0}$  – предел текучести металла отожженного образца, МПа;  $\sigma_{\tau 1}$ ,  $\sigma_{\tau 2}$ ,  $\sigma_{\tau 3}$  – предел текучести металла после прокатки в соответствии с обжатиями  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ , МПа.



а



б



Рисунок 2.2 – Машина Zwick/Roell Z250 и образцы при испытании на растяжение для определения механических свойств медного сплава М0: а – образец до растяжения; б – образец после растяжения.



Для этого проводились процессы холодной прокатки 9 тонких медных (М0) полос (начальная толщина  $h_0 \approx 3\text{мм}$ , ширина  $b_0 \approx 25\text{мм}$  и длина  $l_0 \approx 200\text{мм}$ ) по три образца с обжатием  $\varepsilon_1 \approx 10$ ,  $\varepsilon_2 \approx 20$  и  $\varepsilon_3 \approx 30\%$  в сухих валках на двухвалковом стане 150x235 в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского политехнического университета (рисунок 2.1).

Испытания для определения механических свойств образцов до и после прокатки выполнялись на машине Zwick/Roell Z250 (рисунок 2.2) в лаборатории Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Форма и размеры заготовок вырезались по ГОСТу 1497 – 84 и показаны на рисунке 2.3 [104]. При испытании скорость растяжения равна 5 мм/мин и расчетная длина:  $l_0 = 15\text{мм}$ .

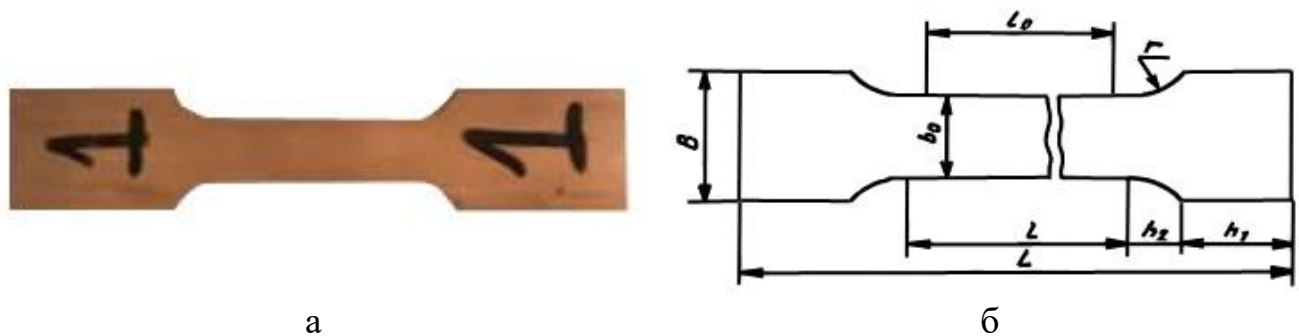


Рисунок 2.3 – Медная (М0) образца для растяжения (а) и размеры образцы (б):

$$b_0 = 7,5\text{мм}; B = 15\text{мм}; l = 25\text{мм}; l_0 = 15\text{мм}; L = 75\text{мм}; h_1 = 20\text{мм}; h_2 = 5\text{мм};$$

$$r = 5\text{мм}.$$

В результате испытаний получены кривые растяжения образцов, которые характеризуют показатели механических свойств (рисунки 2.4 и 2.5). По этим кривым можно оценивать реологию материала и определять напряжения в упругой и пластической области ( $\sigma_{\text{т}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ), а также относительные удлинения  $\delta$  образцов из меди М0 известного химического состава.

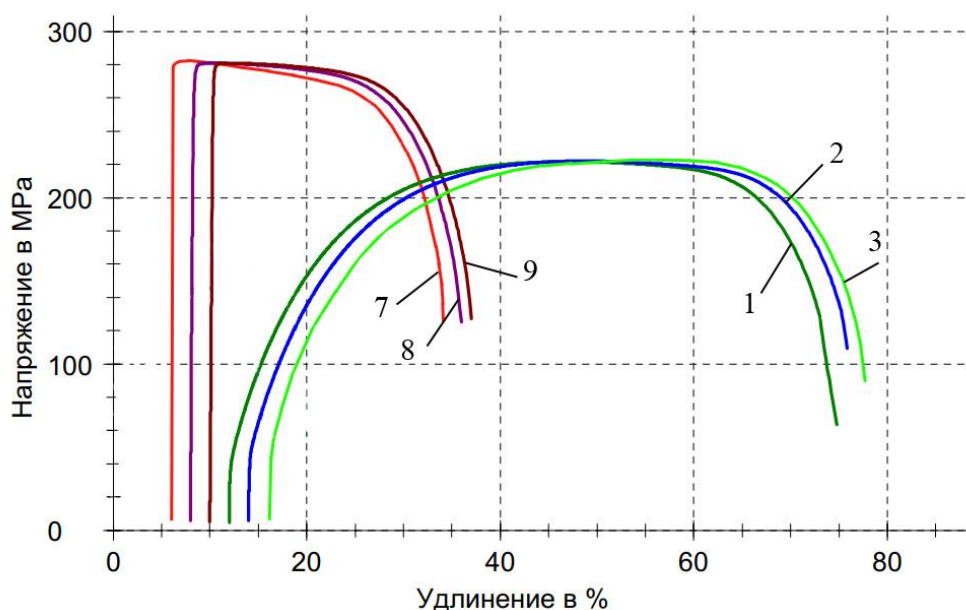


Рисунок 2.4 – Изменение напряжений и относительных удлинений  $\delta$  при растяжении отожженных и деформированных медных (М0) образцов

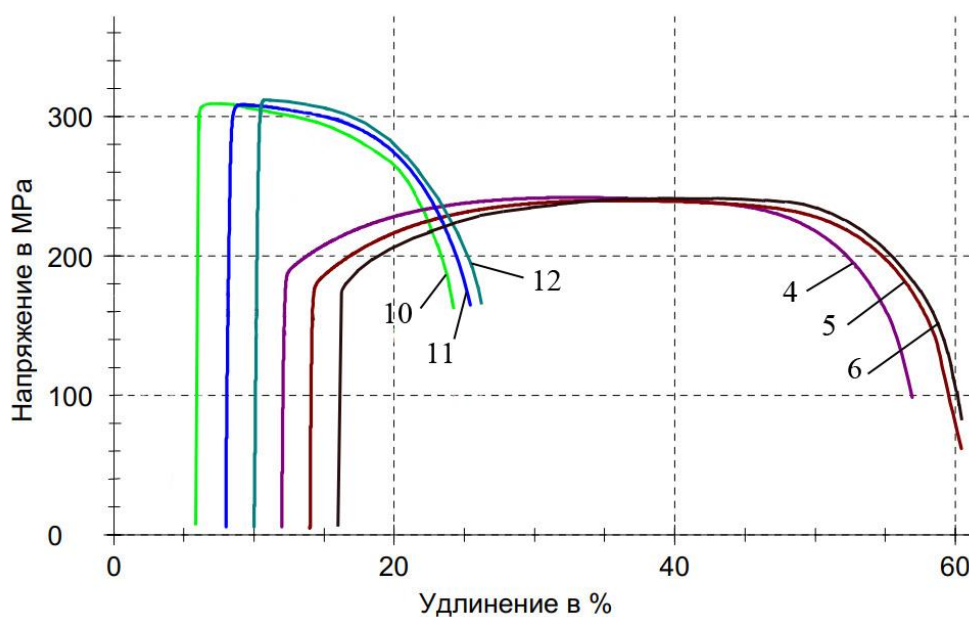


Рисунок 2.5 – Изменение напряжений и относительных удлинений  $\delta$  при растяжении деформированных медных (М0) образцов

На рисунках 2.4 и 2.5: 1, 2, 3 – отожженные образцы; 4, 5, 6 – относительное обжатие полос  $\varepsilon \approx 10\%$ ; 7, 8, 9 –  $\varepsilon \approx 20\%$ ; 10, 11, 12 –  $\varepsilon \approx 30\%$ .

Реология отожженных мягких образцов (кривые 1, 2 и 3) существенно отличается от деформированных прокаткой напряжения плавно переходят из

упругой и короткой в пластическую длинную область, где относительное удлинение превышает 63%. Медь М0 начинает деформироваться при низком напряжении  $\sigma_T = 41 - 47 \text{ МПа}$  и разрушается при  $\sigma_B = 221 - 222 \text{ МПа}$ . После прокатки отожженных полос с обжатием 10% показатель пластичности  $\delta$  снизился незначительно на 15%, а предел текучести  $\sigma_T$  вырос до 173 – 186 МПа в 4 раза. При этом предел прочности  $\sigma_B$  увеличился незначительно на 17 – 20 МПа до 239 – 242 МПа, что показано на кривых 4, 5 и 6 (рисунок 2.5). Если относительное обжатие полос превышает 30%, то напряжения  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  увеличиваются до 301 – 308 и 308 – 315 МПа соответственно и близки по значениям, а относительное удлинение (пластичность) проката снижается до 16 – 17%, что позволяет деформировать полосы до более тонких размеров.

Таблица 2.2 – Основные показатели механических свойств прокатанных полос из медного сплава М0

№ об.	$h_0$ мм	$h_1$ мм	$\varepsilon$ %	$\sigma_T$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ %
1	3,05	—	0	41	222	62,8
2	3,05	—	0	45	221	61,9
3	3,07	—	0	47	222	61,7
4	3,05	2,74	10,16	173	239	47,1
5	3,07	2,75	10,42	177	240	46,4
6	3,06	2,72	11,11	186	242	44,9
7	3,04	2,43	20,07	272	281	27,9
8	3,04	2,42	20,39	273	283	27,1
9	3,05	2,36	22,62	277	284	26,9
10	3,06	2,20	28,10	301	308	17,3
11	3,08	2,15	30,19	307	312	16,8
12	3,06	2,13	30,39	308	315	16,1

Основные результаты определения механических свойств прокатанных полос из меди М0 известного химического состава приведены в таблице 2.2.

В таблице 2.2 обозначено:  $h_0, h_1$  – толщина полосы на входе и выходе валков, мм;  $\varepsilon$  – относительное обжатие, %;  $\sigma_T$  – экспериментальные величины предела текучести (сопротивления деформации), МПа;  $\sigma_B$  – экспериментальные величины временного сопротивления, МПа;  $\delta$  – относительное удлинение образцов при растяжении, %.

С использованием данных в таблице 2.2 для определения коэффициентов в системе уравнений (2.3). Результаты были получены и использованы для расчета предела текучести металла  $\sigma_T$  и врем  $\sigma_B$  при холодной прокатке тонких полос из медного (М0) сплава (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты расчета коэффициентов А, В, D в уравнении (2.1) для определения зависимости  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  от относительного обжатия при холодной прокатке тонких полос медного (М0) сплава и коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$

	А	В	D	$R^2$
Предел текучести, $\sigma_T$	44	30,55	0,64	0,95
Временное сопротивление, $\sigma_B$	222	0,49	1,55	0,96

Уравнения для расчета основных показателей механических свойств при деформации медного сплава М0 известного химического состава имеют вид:

Уравнение для расчета предела текучести (сопротивления деформации):

$$\sigma_T = 44 + 30,55\varepsilon^{0,64}, R^2 = 0,95 \quad (2.4)$$

Уравнение для расчета временного сопротивления:

$$\sigma_B = 222 + 0,49\varepsilon^{1,55}, R^2 = 0,96 \quad (2.5)$$

Уравнение для определения относительного удлинения

$$\lg \delta = -0,0003\varepsilon^2 + 0,0098\varepsilon + 1,7961, R^2 = 0,98 \quad (2.6)$$

Достаточно высокие коэффициенты достоверности позволяют рекомендовать полученные уравнения для применения на практике.

Результаты исследования позволили установить количественные закономерности изменения и построить графики зависимостей сопротивления деформации  $\sigma_T$  (предела текучести),  $\sigma_B$  (временного сопротивления) и относительного удлинения  $\delta$  от степени деформации  $\varepsilon$  при холодной прокатке медных (М0) полос (рисунок 2.6).

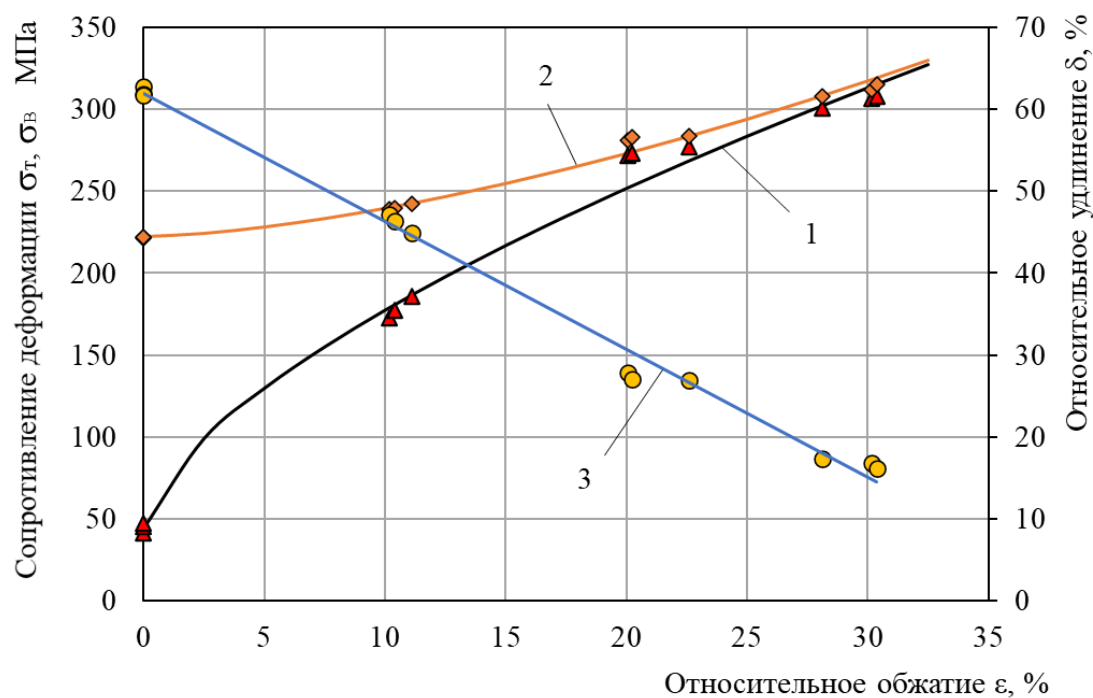


Рисунок 2.6 – Зависимости предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения медного сплава М0 от обжатия: 1 – предел текучести  $\sigma_T$ ; 2 – временное сопротивление  $\sigma_B$ ; 3 – относительное удлинение  $\delta$ .

Анализ графиков на рис. 2.6 показал, что временное сопротивление  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  с увеличением обжатия возрастают с различной интенсивностью:  $\sigma_B$  медленно увеличивается монотонно практически по

линейному закону от 221 до 315 МПа при обжатии от 0 до 30%; а  $\sigma_T$  – интенсивно возрастает по параболическому закону от 41 до 308 МПа; показатель пластичность в этом диапазоне деформирования снижается от 63 до 16%.

## **2.5. Определение основных механических свойств медных (М0) полос по показателям твердости по Виккерсу и Бринеллю при холодной прокатке.**

В процессе холодной прокатки полос и листов механические свойства металлов изменяется. Исследования авторов в литературах показали, что существует множество методов определения механических свойств, а также твердости в процессе обработки металлов давлением [80 – 86]. В этой работе проведение испытаний образцов из меди М0 на разрыв с измерением сил и деформаций для определения механических показателей универсальной испытательной машине Zwick/Roell для построения взаимосвязей между механическими показателями: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, твердость и деформационные показатели, чтобы иметь возможность быстро рассчитать эти показатели после определения одного из них с высокой надежностью и точностью.

### ***Метод измерения твердости по Виккерсу.***

По ГОСТу 2999 – 75 в качестве индентора используется четырехгранная алмазная пирамида, которая вдавливается в образец под нагрузкой  $P=1\text{ кгс}$  (10Н) с выдержкой 10с (рисунок 2.7) [105]. Выполнили испытания для измерения твердости по Виккерсу (HV) по схеме на рисунке 2.7 твердомером MEKON DUROLINE MH-6 в лаборатории университета «МИСиС» (рисунок 2.8).

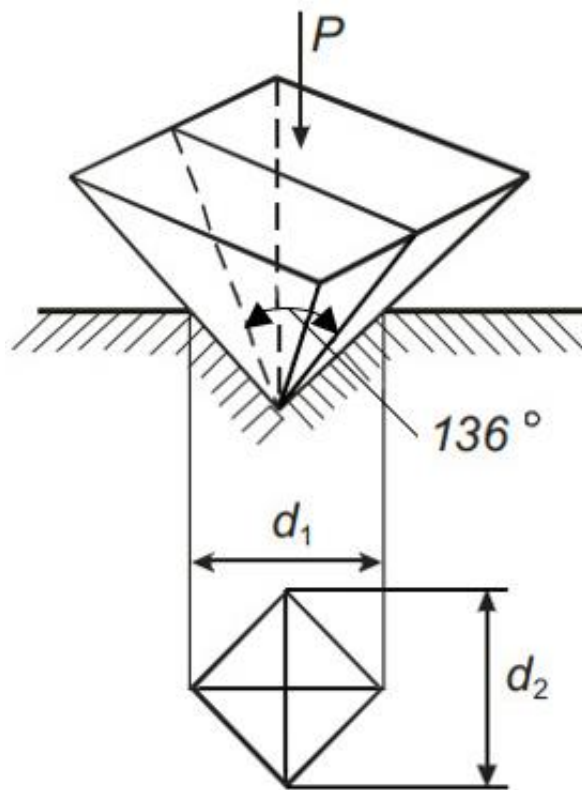


Рисунок 2.7 – Схема измерения твердости металла по Виккерсу [105]

Измеряли диагонали ромба  $d_1$  и  $d_2$  для определения среднего арифметического:

$$d_{cp} = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (2.7)$$

Твердость металла определяли по формуле:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d_{cp}^2} = 0,189 \frac{F}{d_{cp}^2}, \quad (2.8)$$

где:  $F$  – нагрузка, Н.

$$HV = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d_{cp}^2} = 1,854 \frac{P}{d_{cp}^2}, \quad (2.9)$$

где:  $P$  – нагрузка на индентор, кгс. Твердость (HV) записывается в МПа.



Рисунок 2.8 – Твердомер MEKON DUROLINE MH-6 для измерения твердости по Виккерсу образцов из меди М0 в лаборатории Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

В работе [106] представлены таблицы соответствия твердости материалов, измеренные различными методами. Данные, приведенные в этих таблицах, позволяют установить корреляцию между твердостью по Виккерсу и по Бринеллю (рисунок 2.9). После обработки этих данных методом математической статистики, получено уравнение (2.10) для расчета твердостей по Бринеллю (HB) из твердостей по Виккерсу (HV).

Уравнение для расчета твердостей по Бринеллю (HB) из твердостей по Виккерсу (HV):

$$HB = 0,83 \cdot HV + 5,3; \quad R^2 = 0,98, \quad (2.10)$$

где:  $R^2$  - коэффициент корреляций.



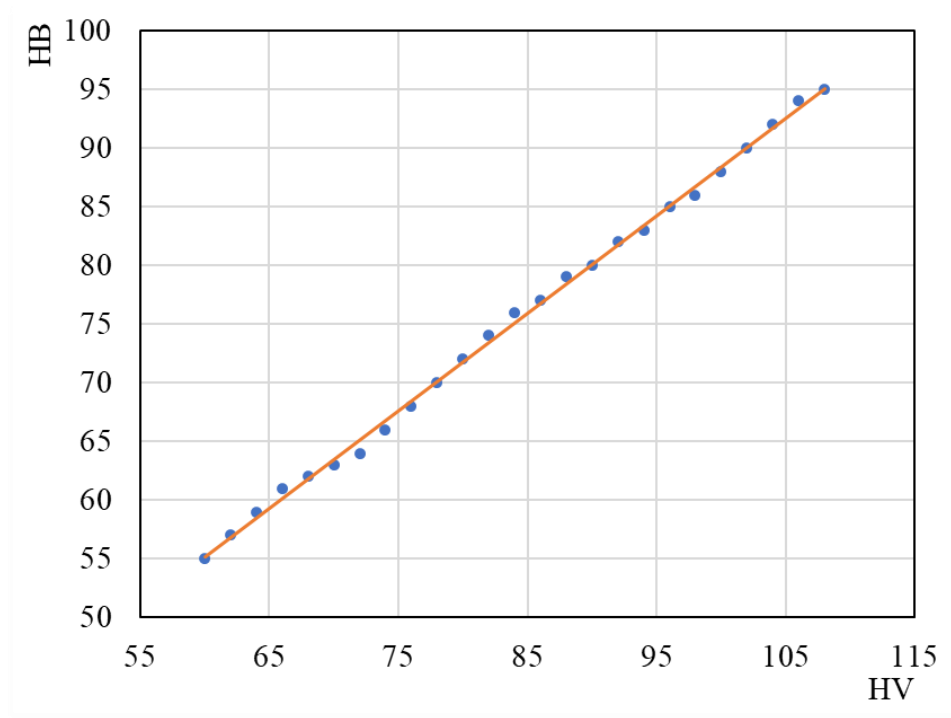


Рисунок 2.9 – Корреляция между твердостями по Бринеллю (HB) и по Виккерсу (HV) медного M0 сплава.

***Зависимость твердости от относительного обжатия.***

Показано, что при холодной прокатке металлов и их сплавов твердости (HV и HB) зависят от суммарного относительного обжатия полосы  $\varepsilon(\%)$ . Эти зависимости представляются математическими уравнениями, которые имеют виды:

$$HV = A_V + B_V \cdot \varepsilon^{D_V}, \quad (2.11)$$

$$HB = A_B + B_B \cdot \varepsilon^{D_B}, \quad (2.12)$$

где:  $A_V$ ,  $A_B$ ,  $B_V$ ,  $B_B$ ,  $D_V$  и  $D_B$  эмпирические коэффициенты,  $\varepsilon$  - относительное обжатие при холодной прокатке.

Очевидно, что в уравнениях (2.11) и (2.12) наличие четырех неизвестных величин (твердости и 3 коэффициенты A, B, D), поэтому конкретные виды уравнений (2.11) и (2.12) только определяются при измерении твердостей

выполнены на четырех образцов с различными обжатиями. В этом случае выбраны относительные обжатия: 0% (отожженная образца); 10; 20 и 30%.

***Зависимость механических показателей от твердости.***

В работах [79 – 85] приведены структуры формулы для расчета предела текучести  $\sigma_T$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  в зависимости от фактических значений твердости. Эти формулы имеют виды:

$$\sigma_T = a_0 \cdot HB + a_1, \quad (2.13)$$

$$\sigma_T = b_0 \cdot HV + b_1, \quad (2.14)$$

$$\sigma_B = c_0 \cdot HB + c_1, \quad (2.15)$$

$$\sigma_B = d_0 \cdot HV + d_1, \quad (2.16)$$

где:  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  – предел текучести и временное сопротивление металла, (МПа); HB – твердость по Бринеллю; HV – твердость по Виккерсу;  $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1, d_0, d_1$  – эмпирические коэффициенты.

Результаты измерения твердости по Виккерсу в пяти точках опытных полос из меди М0 известного химического состава и переводы их на твердости по Бринеллю приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Твердость по Виккерсу (HV) и Бринеллю (HB) медных М0 полос

Место измерения	Ненаклёпанная полоса ( $\varepsilon = 0\%$ )		Образца №1 ( $\varepsilon_1 \approx 10\%$ )		Образца №2 ( $\varepsilon_2 \approx 20\%$ )		Образца №3 ( $\varepsilon_3 \approx 30\%$ )	
	HV	HB	HV	HB	HV	HB	HV	HB
1	66,3	60,4	86,8	77,5	92,3	82,0	107,6	94,7
2	65,0	59,3	80,1	71,9	98,2	86,9	106,8	94,1
3	66,8	60,8	80,2	72,0	95,5	84,7	105,1	92,7
4	61,2	56,2	83,2	74,5	96,7	85,7	109,2	96,1
5	61,7	56,6	86,2	77,0	97,1	86,0	109,9	96,7

Результаты измерения твердости отожженных образцов и полос из меди М0 после холодной прокатки с различными обжатиями (10, 20 и 30%), приведенные в таблице 2.4 позволяют построить графики зависимостей твердости по Виккерсу (HV) и по Бринеллю (HB) от степени деформации (рисунок 2.10).

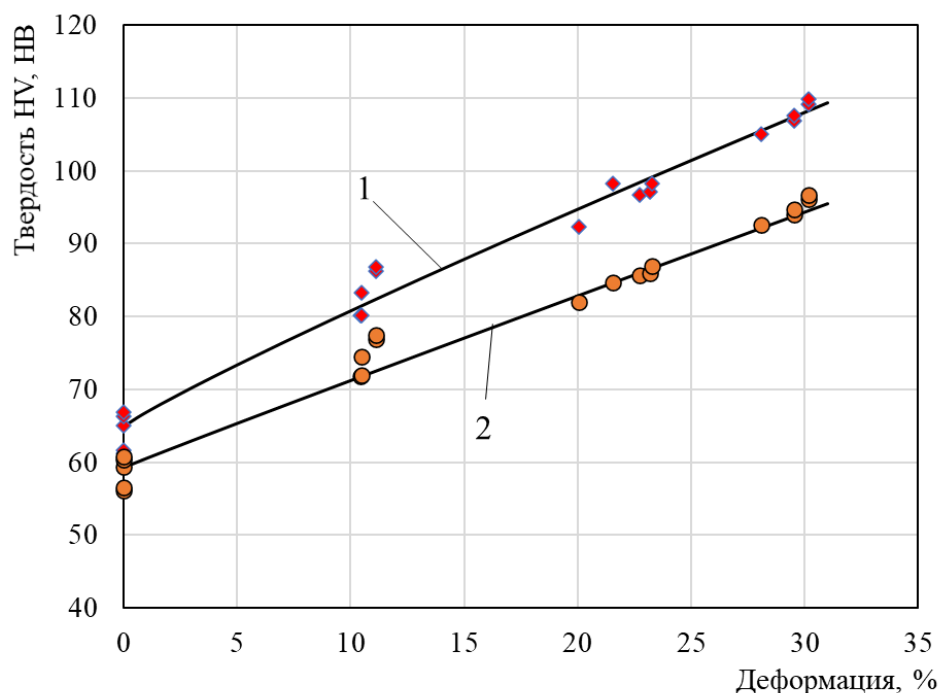


Рисунок 2.10 – Зависимости твердости медных М0 полос от обжатия: 1 – твердость по Виккерсу (HV); 2 – твердость по Бринеллю (HB).

Получены уравнения для определения двух показателей твердости по относительным обжатиям медных полос после холодной прокатки:

$$HV = 65 + 1,95\varepsilon^{0,91}; R^2 = 0,96 \quad (2.17)$$

$$HB = 59,33 + 1,25\varepsilon^{0,98}; R^2 = 0,95 \quad (2.18)$$

Анализ графиков на рисунке 2.12 показал, что при холодной прокатки величины твердости зависят от относительного обжатия полос из меди М0 по линейным законам. При увеличении обжатий от 0 до 30% твердости HV и HB увеличиваются от 61 до 110 HV и 56 – 97 HB соответственно. Полученные графики и уравнения могут быть использованы на заводах по обработке медных (М0) сплав для определения значений твердости листового проката в зависимости от обжатия полосы на стане.

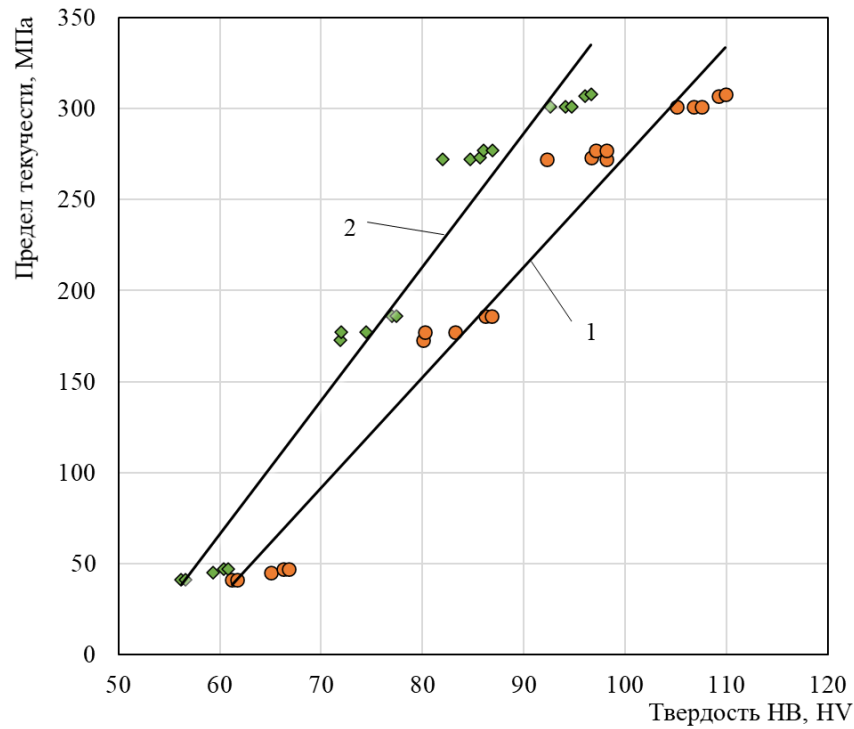


Рисунок 2.11 – Зависимости предела текучести полос из медного М0 сплава от твердостей по Бринеллю (НВ) и Виккерсу (НВ): 1 – зависимость  $\sigma_T$  от НВ; 2 – зависимости  $\sigma_T$  от НВ.

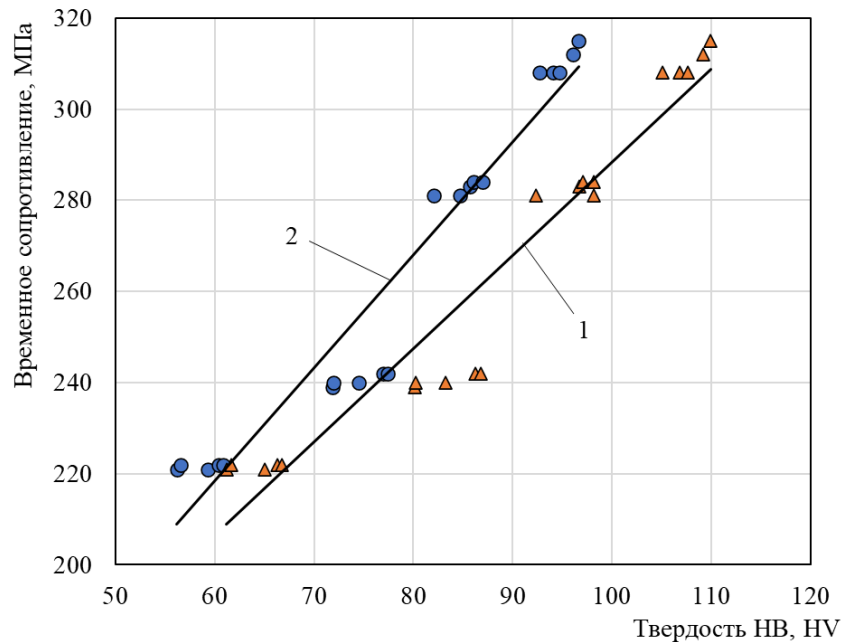


Рисунок 2.12 – Зависимости временного сопротивления полос из медного М0 сплава от твердостей по Бринеллю (НВ) и Виккерсу (НВ): 1 – зависимость  $\sigma_B$  от НВ; 2 – зависимости  $\sigma_B$  от НВ.

Результаты исследования, приведенные в таблицах 2.2 и 2.3 позволили получить зависимости основных показателей механических (предела текучести, временного сопротивления) и пластических (относительного удлинения) от величин твердости HV и HB прокатанных полос из медного М0 сплава (рисунки 2.11 и 2.12).

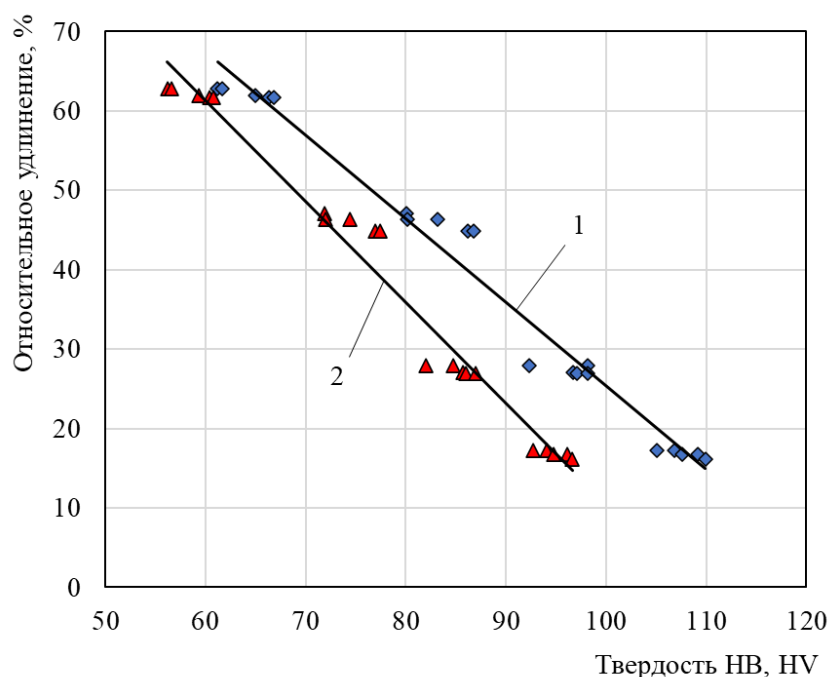


Рисунок 2.13 – Зависимости относительного удлинения  $\delta$  полос из медного М0 сплава от твердостей: 1 – по Виккерсу (HV); 2 – по Бринеллю (HB)

Для расчета основных показателей механических свойств полос из меди М0 по значениям твердости получены следующие регрессионные уравнения.

Уравнения для расчета предела текучести по HV и HB:

$$\sigma_T = 7,33 \cdot HB - 373,4; R^2 = 0,94 \quad (2.19)$$

$$\sigma_T = 6,05 \cdot HV - 331,66; R^2 = 0,95 \quad (2.20)$$

Уравнения для расчета временного сопротивления по HV и HB:

$$\sigma_B = 2,48 \cdot HV + 69,55; R^2 = 0,93 \quad (2.21)$$

$$\sigma_B = 2,05 \cdot HB + 83,31; R^2 = 0,93 \quad (2.22)$$

Уравнения для расчета относительного удлинения по HV и HB:

$$\delta = -1,04 \cdot HV + 129,84; R^2 = 0,97 \quad (2.23)$$

$$\delta = -1,26 \cdot HB + 137,43; R^2 = 0,97 \quad (2.24)$$

Исследование полученных уравнений позволяет на промышленных предприятиях по прокатке меди определять механические показатели: предел текучести, временное сопротивление и относительное удлинение по результатам измерения твердости HV или HB, без проведения испытаний металла на разрыв. Это позволяет существенно экономить материальные и трудовые ресурсы при определении механических свойств при холодной прокатке тонких полос из меди М0.

## Выводы по главе 2

1. Установлен конкретный химический состав полос меди М0, которая прокатывается на стане 175х300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най и используется для заготовок листовой штамповки во Вьетнаме. Химический состав медных полос соответствует межгосударственному и российскому стандарту ГОСТ 859 – 2014.

2. Установлены закономерности изменения прочностных и пластической характеристик от степени холодной деформации полос медного сплава М0 известного химического состава. Показано, что временное сопротивление  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_T$  с увеличением обжатия возрастают с различной интенсивностью:  $\sigma_b$  увеличивается монотонно практически по линейному закону от 221 до 315 МПа;  $\sigma_T$  – интенсивно возрастает от 41 до 308 МПа по параболическому закону при обжатии от 0 до 30%. Показатель пластичности –  $\delta$  уменьшается от 63 до 16% по линейному закону.

3. Получены адекватные регрессионные уравнения для расчета предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения медного сплава М0 при прокатке полос с обжатием до 30%.

4. Использование полученных регрессионных уравнений для расчета сопротивления металла деформации и других реологических свойств медного сплава М0 найдет применение в системах автоматизированного проектирования (САПР) и определения силовых показателей процессов холодной прокатки полос и лент.

5. Установлены закономерности изменения твердости от обжатия медных (М0) полос при холодной прокатке. Определены зависимости показателей твердости (НВ и НV) от степени деформации полос с обжатиями  $\varepsilon = 0 \div 30\%$ . Показано, что с увеличением обжатия от 0 до 30% твердость НV и НВ возрастает по линейному закону с 61 до 110 НV и с 56 – 97 в соответствии. Получены

уравнения для расчета величин твердости HB и HV от степени деформации  $\varepsilon$  при холодной прокатке медных М0 полос.

6. Построены графики и получены зависимости основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от показателей твердостей (HB и HV) прокатанных полос из меди М0. Полученные регрессионные уравнения позволяют определять механические показатели медных М0 полос по твердостям (HB и HV) с высокими коэффициентами корреляции.

7. Результаты исследования могут быть использованы на промышленных предприятиях и прежде всего на заводах при определении основных механических свойств прокатываемых полос и лент из меди М0 по измеренным показателям твердости без проведения испытания образцов на разрыв.



### **Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ, СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И РАЗМЕРЫ ПО ДЛИНЕ ПОЛОС ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ МЕДНОГО М0 СПЛАВА**

#### **3.1. Влияние технологических смазок на степень деформации, силу прокатки и размеры по длине медных полос при холодной прокатке.**

Одним из тонких управляющих воздействий, определяющих процесс деформации при холодной прокатке полос, является контактное трение в очаге деформации. Наличие контактного трения и сил трения определяют захватывающую способность валков, в том числе и при тонколистовой прокатке, и при установившемся процессе влияют на степень деформации по толщине и ширине металла. Силы внешнего трения вызывают повышение сопротивления металла и энергии деформации [107, 108]. Поэтому изменение коэффициента и сил трения, в частности за счет технологической смазки, позволяет влиять на силу прокатки.

Многочисленными исследованиями [109 – 120] установлено, что технологическая смазка, уменьшая коэффициент трения, понижает давление на контактной поверхности, снижает упругие деформации рабочего инструмента, за счет чего возрастает величину обжатия и повышается эффективность процесса. Распределение давления по дуге контакта и его изменение при использовании различных технологических смазок, а следовательно, и силы прокатки, зависят от толщины прокатываемой полосы, свойств смазки, влияющих на коэффициент контактного трения, обжатия, диаметра валков и механических свойств полос (предела текучести и временного сопротивления металла деформации), зависящих от химического состава и технологий производства заготовок на предыдущих стадиях обработки на заводе.

Результаты исследования позволяют установить количественные закономерности влияния различных технологических смазок на степень деформации, силу прокатки и размеры полос из меди М0 известного химического состава.

Процесс холодной прокатки тонких полос проводили на лабораторном двухвалковом прокатном стане 150x235, который состоит системы контроля для определения силы прокатки в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского политехнического университета.

С зазором между валками  $S_0 = 2,10$  мм прокатали 15 образцов полос с размерами 3x25x200 мм из меди М0 конкретного химического состава [121]. При этом, по 3 полос прокатали в сухих валках, по 3 полос прокатали со смазкой пальмовым маслом, по 3 полос – со смазкой эмульсией 6% (СПЗ), по 3 полос – со смазкой индустриальным маслом И40 (5%) и по 3 полос – со смазкой подсолнечным маслом (5%).

До и после прокатки измерили размеры полос в трех точках 1 (н), 2 (с) и 3 (к) штангенциркулем с точностью  $\pm 0,01$  мм и силу прокатки с точностью  $\pm 0,01$  кН микропроцессорной системой контроля на стане [122]. Данная система контроля сил прокатки позволяет 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 [123].

Результаты измерений представлены в таблице 3.1, где:  $h_0, h_1$  – толщины полос на входе и выходе, мм;  $b_0, b_1$  – ширина полос на входе и выходе, мм;  $l_0, l_1$  – длина полос до и после прокатки, мм;  $\varepsilon$  – относительное обжатие металла, %;  $P_s$  – измеренные силы прокатки, кН;  $P_{расч}$  – расчетные силы прокатки, кН;  $\Delta P$  – погрешность между экспериментальной и рассчитанной силой прокатки, кН.

Таблица 3.1 – Деформационные, силовые показатели и размеры медных (М0) полос при холодной прокатке на двухвалковом стане 150x235 с различными технологическими смазками

Смазка	Место	$h_0$ , мм	$b_0$ , мм	$l_0$ , мм	$h_1$ , мм	$b_1$ , мм	$l_1$ , мм	$\varepsilon$ , %	$P_{расч}$ , кН	$P_э$ , кН	$\Delta P$ , кН
Пальмовое масло, 0,066	1 (н)	3,05	24,94	0	2,37	26,42	0	22,30	31,84	32,12	0,87
	2 (с)	3,05	24,92	101	2,4	25,50	124	21,31	50,12	49,61	-1,03
	3 (к)	3,06	24,62	201	2,38	26,39	248	22,22	31,58	32,51	2,87
СПЗ (6%) 0,074	1 (н)	3,06	24,94	0	2,4	26,43	0	21,57	30,90	31,25	1,11
	2 (с)	3,06	24,93	101	2,44	25,37	122	20,26	53,63	50,22	-6,8
	3 (к)	3,07	24,91	201	2,41	26,50	245	21,50	30,88	30,86	-0,07
И40 (5%) 0,076	1 (н)	3,05	24,92	0	2,4	26,12	0	21,31	30,30	30,81	1,64
	2 (с)	3,06	24,93	101	2,45	25,28	122	19,93	52,60	51,06	-3,02
	3 (к)	3,06	24,92	201	2,41	26,72	244	21,24	30,62	30,79	0,57
Под. масло (5%) 0,079	1 (н)	3,05	24,92	0	2,41	26,33	0	20,98	29,98	30,13	0,49
	2 (с)	3,06	24,92	101	2,46	25,19	122	19,61	53,13	52,11	-1,96
	3 (к)	3,05	24,94	201	2,41	26,44	243	20,98	30,06	30,08	0,07
Сухие валки, 0,09	1 (н)	3,05	24,92	0	2,42	25,50	0	20,66	29,06	29,55	1,67
	2 (с)	3,06	24,91	101	2,49	25,28	120	18,63	55,70	53,32	-4,46
	3 (к)	3,06	24,93	201	2,43	25,58	240	20,59	29,07	29,72	2,20

Коэффициенты контактного трения  $f_{тр}$  при холодной прокатке с различными технологическими смазками определяли по уравнению (3.1) А.П. Грудева [121].

$$f_{тр} = K_{см} \frac{1 + (0,4 + 0,01\varepsilon)R_z}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005v_{50}} \left( 0,07 - \frac{0,1v^2}{2(1+v) + 3v^2} \right), \quad (3.1)$$

где:  $R_z$  – шероховатость поверхности валков,  $R_z = 1,6\text{мкм}$ ;  $v_{50}$  – кинематическая вязкость смазки при  $50^\circ\text{C}$ ,  $v_{50} = 30\text{м}^2/\text{с}$  (И40),  $v_{50} = 31\text{м}^2/\text{с}$  (подсолнечное масло);  $v$  – скорость прокатки,  $v = 0,25\text{м}/\text{с}$ ;  $K_{см} = 1,0$  (для растительных масел) и  $K_{см} = 1,4$  (для минеральных масел).

Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения: со смазкой пальмовым маслом –  $f_{тр} = 0,066$ ; с СПЗ –  $f_{тр} = 0,074$ ; с И40 (5%) –  $f_{тр} = 0,076$  и с подсолнечным маслом (5%) –  $f_{тр} = 0,079$ . При холодной

прокатке меди в сухих валках коэффициент трения составляет  $f_{\text{тр}} = 0,09$ .

Результаты эксперимента в лаборатории показаны влияние технологических смазок на деформационные и силовые показатели прокатки. Эти результаты позволили установить количественное влияние условий контактного трения на показатели прокатки образцов из меди М0 [124].

### ***Влияние технологических смазок на силовые показатели.***

На лабораторном стане 150x235 при холодной прокатке полос из меди М0 среднее значение силы прокатки в основной части раската составило: в сухих валках – 53,32 кН, а при смазке пальмовым маслом – 49,61 кН, при смазке СПЗ (6%) – 50,27 кН, индустриальным маслом И40 (5%) – 51,06 кН, подсолнечным маслом (5%) – 52,11 кН.

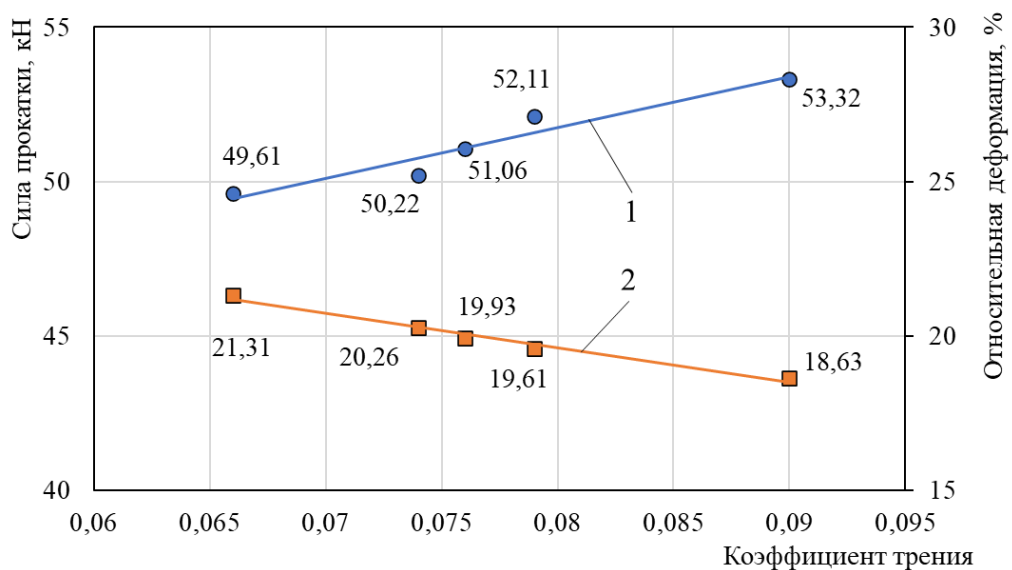


Рисунок 3.1 – Влияние технологических смазок на максимальную силу прокатки и относительное обжатие образцы при холодной прокатке на стане 150x235

На рисунке 3.1 показаны графики влияния условий контактного трения на силу прокатки. Применение технологических смазок позволяет уменьшить силу прокатки. При смазке подсолнечным маслом сила прокатки уменьшается на 1,21

кН (2,3%), индустриальным – на 2,26 кН (4,3%), при смазке СПЗ – на 3,05 кН (5,8%) и пальмовым – на 3,71 кН (7%). Причем наиболее эффективной (7%) является смазка пальмовым маслом при прокатке медных (М0) полос. Эти результаты позволяют учитывать разработки технологических режимов прокатки полос, листов и лент на заводах.

### ***Влияние технологических смазок на деформационные показатели.***

Условия контактного трения влияют на деформационные показатели прокатки. На рисунке 3.1 показано влияние усилий контактного трения на изменение степени деформации металла. Улучшенные условия контактного трения позволяют повысить относительное обжатие и уменьшить толщину полос после прокатки без изменения зазора между валками. При прокатке полос из меди М0 в сухих валках ( $f_{\text{тр}} = 0,09$ ) с зазором между валками  $S_0 = 2,10$  мм в основной части среднее относительное обжатие  $\varepsilon = 18,63\%$ , средняя толщина  $h_1 = 2,49$  мм в средней точке, при смазке подсолнечным маслом (5%) ( $f_{\text{тр}} = 0,079$ ),  $\varepsilon = 19,61\%$ ,  $h_1 = 2,46$  мм, при смазке индустриальным маслом И40 (5%) ( $f_{\text{тр}} = 0,076$ ),  $\varepsilon = 19,93\%$ ,  $h_1 = 2,45$  мм, при смазке СПЗ (6%) ( $f_{\text{тр}} = 0,074$ ),  $\varepsilon = 20,26\%$ ,  $h_1 = 2,44$  мм, а при смазке пальмовым маслом ( $f_{\text{тр}} = 0,066$ ) относительное обжатие  $\varepsilon = 21,31\%$ , толщина полосы после прокатки  $h_1 = 2,40$  мм. Следовательно, применение технологических смазок пальмовым маслом при прокатке медных (М0) полос увеличивает величину относительного обжатия на 2,68% и уменьшает толщину полос после прокатки примерно до 0,09 мм.

Применение результатов опытных прокаток позволяет проектировать рациональные режимы прокатки полос, листов и лент из меди М0 на промышленных станах.

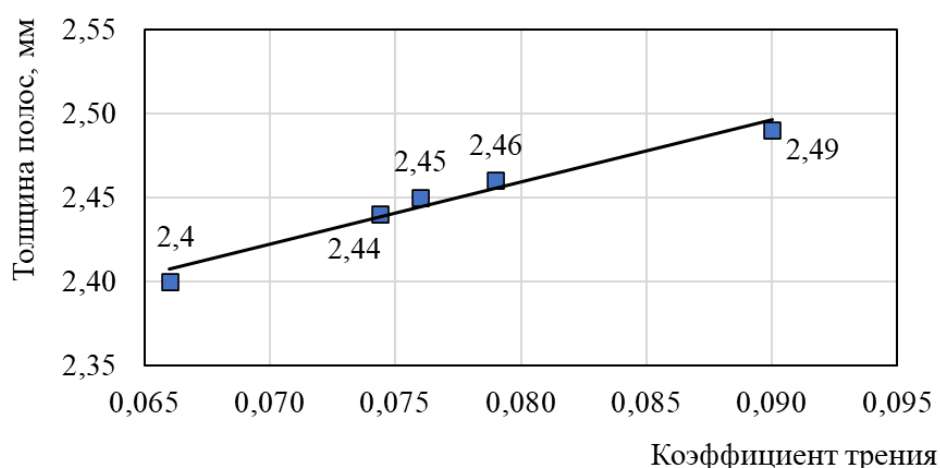


Рисунок 3.2 – Влияние условия контактного трения при холодной прокатке полос из меди М0 на стане 150х235 с различными технологическими смазками на толщину образцы на выходе из валков  $h_1$

***Влияние технологических смазок на степень деформации и силу прокатки по длине полос.***

Из данных, которые приведены в таблице 3.1 и на рисунке 3.3, очевидно, что применение различных технологических смазок при холодной прокатке медных (М0) полос существенно влияет на изменения деформационных и силовых показателей по длине полос. Относительные деформации полос при смазке пальмовым маслом составили на переднем участке 1 (н) – 22,30 и на заднем конце 3 (к) – 22,22%, что больше, чем деформация в их средней точке (21,31%) на 0,99% и 0,91%, при смазке СПЗ на переднем участке – 1,31% и на заднем конце – 1,24%, при смазке И40 на переднем участке – 1,38% и на заднем конце – 1,31%, при смазке подсолнечным маслом на двух участках погрешности равны 1,38%, при прокатке в сухих валках эти погрешности составляют 2,03% и 1,96% соответственно.

Силы прокатки составили на переднем участке 32,12 кН, на заднем – 32,51 кН и 49,61 кН в средней части, разница между силами прокатки на концевых участках и в средней части равна 17,49 кН (35,3%) и 17,10 кН (34,5%) при смазке пальмовым маслом, а при смазке СПЗ – 19,02 кН (37,8%) и 19,41 кН (38,6%), при

смазке И40 – 20,25 кН (39,6%) и 20,27 кН (39,7%), при смазке подсолнечным маслом – 21,98 кН (42,2%) и 22,05 кН (42,3%), при прокатке в сухих валках – 23,77 кН (44,6%) и 23,60 кН (44,3%) соответственно (см. рисунок 3.3).

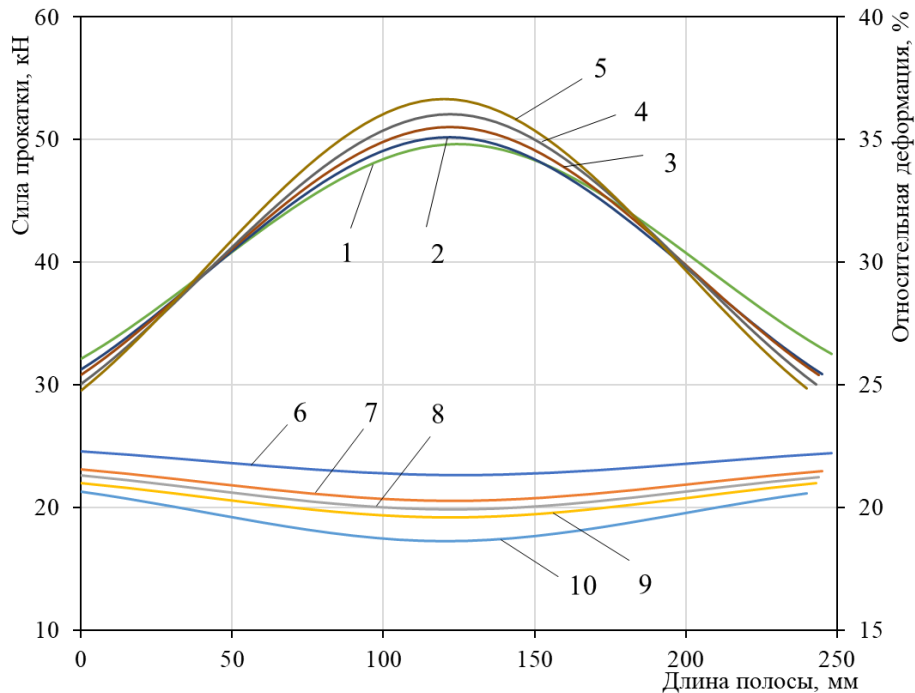


Рисунок 3.3. Влияние технологических смазок на силовые (кривые 1 – 5) и деформационные (кривые 6 – 10) показатели по длине при холодной прокатке медных (М0) полос: кривые 1, 6 – пальмовое масло; кривые 2, 7 – эмульсия (СПЗ) 6%; кривые 3, 8 – индустриальное масло 5%; кривые 4, 9 – подсолнечное масло 5%; кривые 5, 10 – сухие валки.

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

По сравнению с деформацией полос в сухих валках при смазке пальмовым маслом степень деформации в начальной точке выше, чем при сухих валках, и составляет 1,64%, в середине полос – 2,68% и в концевой точке – 1,63%, при смазке СПЗ в начальной точке – 0,91%, в середине полос – 1,63% и в концевой точке – 0,91%, при смазке И40 в начальной точке – 0,66%, в середине полос –

1,31% и в концевой точке – 0,65%, при смазке подсолнечным маслом в начальной точке – 0,33%, в середине полос – 0,98% и в концевой точке – 0,40%.

Сила прокатки в начальной (32,12 кН) и концевой (32,51 кН) точках по длине полос при смазке пальмовым маслом выше, чем в начальной (29,55 кН) и концевой (29,72 кН) точках при прокатке в сухих валках. Разница сил составляет: при прокатке в сухих валках – 2,57 кН и 2,79 кН, при смазке СПЗ в начальной точке – 1,12 кН и в концевой точке – 1,14 кН, при смазке И40 в начальной точке – 1,26 кН и в концевой точке – 1,07 кН, а при смазке подсолнечным в начальной точке – 0,58 кН и в концевой точке – 0,51 кН.

Наоборот, сила прокатки в середине полос при прокатке со смазками ниже, чем при прокатке в сухих валках. Это влияние смазки показано на рисунке 3.1.

Результаты исследования позволяют установить количественные закономерности влияния технологических смазок на степень деформации, силу прокатки и размеры тонких полос из меди М0.

### **3.2. Усовершенствование метода расчета контактного давления и силы при холодной прокатки медных (М0) полос.**

Сила прокатки  $P_{расч}$  на участках деформируемой полосы зависит от величины среднего контактного давления  $p_{ср}$  металла на валки и площади контакта  $F$  по известному уравнению [125]:

$$P_{расч} = p_{ср} F, \quad (3.2)$$

Площадь контакта  $F$  металла с валком определяется по формуле:

$$F = \sqrt{\Delta h R} b_{ср} = l_d b_{ср}, \quad (3.3)$$

где:  $l_d$  – длина дуги захвата (очага деформации) без учета упругого сжатия валов, мм;  $R$  – радиус рабочих валов, мм;  $b_{ср} = (b_0 + b_1) / 2$  – средние ширины полосы в зоне деформации, мм;  $b_0$  и  $b_1$  – ширина полосы на входе и выходе, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие полосы при прокатке, мм.



Среднее контактное давление в установившемся период прокатки зависит от среднего предела текучести металла  $\sigma_{\text{тср}}$ , коэффициента напряженного состояния  $n_{\sigma}$ , коэффициента влияния внеконтактных зон на очаг деформации  $n_{\sigma}$ , и коэффициента влияния натяжения  $n_H$  (при прокатке без натяжения  $n_H = 1$ ). Среднее контактное давление металла на валки определяют по следующему уравнению [124]:

$$p_{\text{ср}} = 1,15 \sigma_{\text{тср}} n_{\sigma} n_H, \quad (3.4)$$

где:  $\sigma_{\text{тср}}$  – среднее значение сопротивления металла деформации на входе  $\sigma_{\text{т0}}$  и выходе  $\sigma_{\text{т1}}$  из валков  $\sigma_{\text{тср}} = (\sigma_{\text{т0}} + \sigma_{\text{т1}}) / 2$ .

Результаты исследований ученых, которые приведены в работах [92, 97, 121] и проведенного эксперимента показывают, что внешние части полосы влияют на давление и силу прокатки. С увеличением жесткости металла и толщины прокатываемой полосы значение коэффициента влияния внешних частей полосы  $n_b$  на очаг деформации возрастает. Поэтому для повышения точности метода расчета среднего давления рекомендуется учитывать коэффициент  $n_b$  влияния внешних частей полосы на очаг деформации. В этом случае давление при прокатке с натяжением определяется по уравнению:

$$p_{\text{ср}} = 1,15 \sigma_{\text{тср}} n_{\sigma} (n_{\sigma} n_b)^{0,5} n_H, \quad (3.5)$$

При прокатке полос или листов без натяжения, когда коэффициент  $n_H = 1$ , среднее давление можно вычислять по уравнению:

$$p_{\text{ср}} = 1,15 \sigma_{\text{тср}} n_{\sigma} (n_{\sigma} n_b)^{0,5}, \quad (3.6)$$

На структуру уравнения для определения коэффициента  $n_b$  влияния внешних частей полос существенное влияние оказывает интенсивность упрочнения, которая характеризуется величиной коэффициента упрочнения  $D$  при обжатии ( $\varepsilon^D$  в уравнении 2.1).

Если в уравнении (2.1), которое характеризует кривую упрочнения при деформации металла или сплава коэффициент упрочнения  $D \geq 0,4$ , то  $n_b$  определяется по формуле:

$$n_b = \frac{\sigma_{т0}}{\sigma_{тсп}} \frac{h_1}{h_{сп}}, \quad (3.7)$$

Если коэффициент упрочнения металла  $D < 0,4$ , то рекомендация использовать для расчета  $n_b$  уравнение:

$$n_b = \frac{\sigma_{т1}}{\sigma_{тсп}} \frac{h_1}{h_{сп}}, \quad (3.8)$$

При прокатке тонких полос и листов, когда  $l_d / h_{сп} > 1$  формула определения  $n_\sigma$  имеет вид [8]:

$$n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{сп}} \right)^{0,5}, \quad (3.9)$$

В работе [10] показано, что  $n_{сп}$  вычисляется по уравнению А.И. Целикова

$$n_{сп} = \frac{2(1-\varepsilon)h_\gamma}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left( \left( \frac{h_\gamma}{h_1} \right)^\delta - 1 \right), \quad (3.10)$$

где:  $\varepsilon$  – относительное обжатие полосы, %;  $\Delta h$  – абсолютное обжатия полосы, мм;  $\delta = 2fl_d / \Delta h$ ;  $f$  – коэффициент контактного трения;  $h_0, h_1$  – толщина полосы до прокатки и после прокатки, мм;  $h_\gamma = \sqrt{h_0 h_1}$  – толщина полосы в нейтральном сечении очага деформации, мм.

При прокатке начала 1(н) и конца 3(к) полосы, на участке длины дуги захвата и выхода металла из валков, среднее контактное давление практически зависит от среднего предела текучести и может быть, определено по формуле:

$$p_{сп} = 1,15\sigma_{тсп}, \quad (3.11)$$

На основании приведенных уравнений разработан алгоритм расчета давления и сил прокатки по длине тонких полос.

Блок-схема алгоритма расчета давления и усилия прокатки показана на рисунке 3.4.

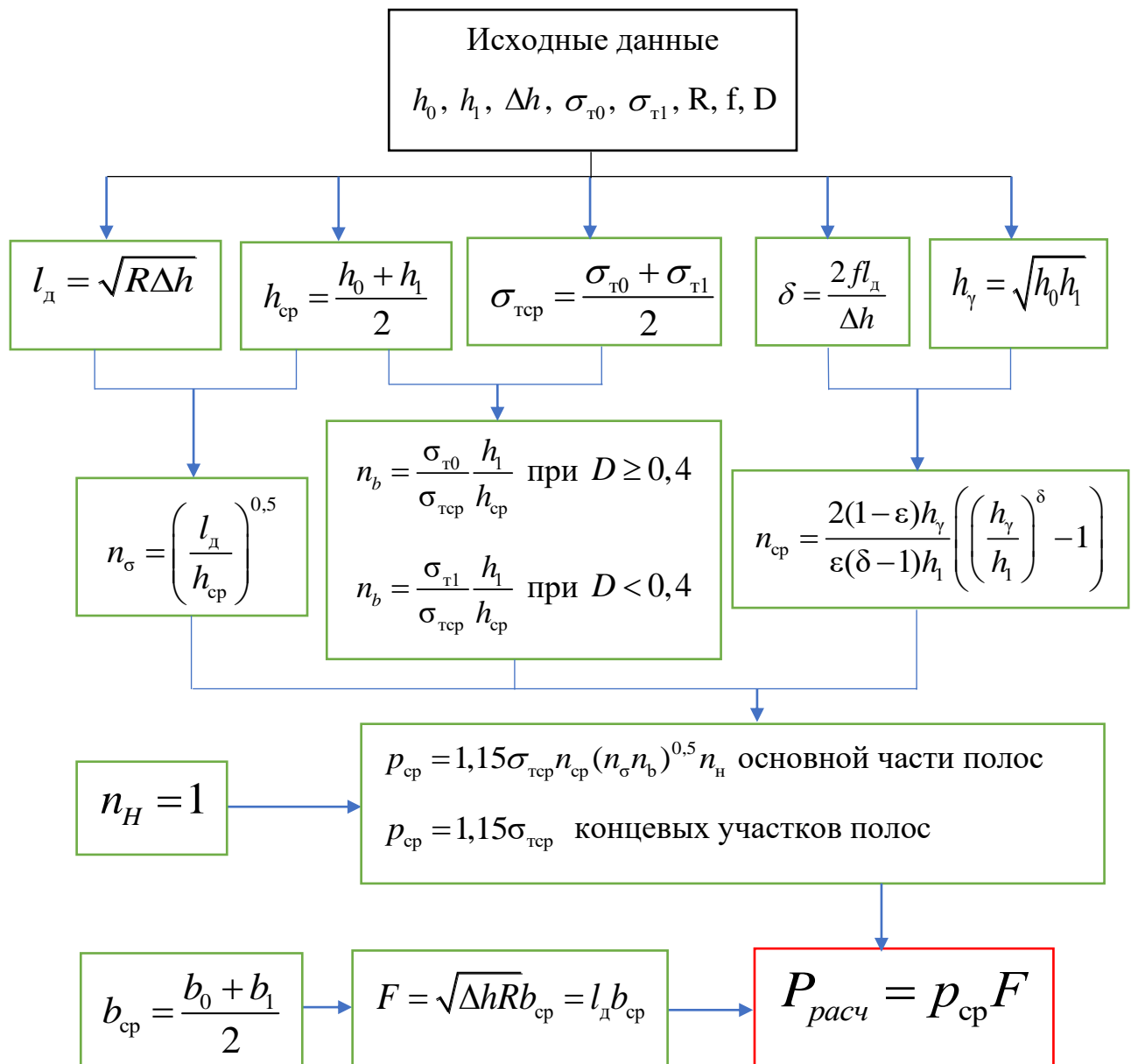


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма расчета давления и силы при холодной прокатке тонких медных полос

С использованием разработанной методики и алгоритма расчета, определим давления и силы прокатки на основных трех участках по длине полосы.

- Вычислим давление и силу прокатки на переднем участке в начале 1 (н) при холодной прокатки медных полос со смазкой СПЗ (6%):

Среднее контактное давление

$$p_{cp1} = 1,15\sigma_{tcp} = 1,15 \cdot 153,05 = 176,01 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Расчетная сила прокатки:

$$P_{расч1} = p_{cp1} F_1 = 176,01 \cdot 175,58 \approx 30903 \text{ (Н)} = 30,9 \text{ (кН)}$$

По измеренному распределению силы прокатки на переднем конце (см. рисунок 3.5) можно определить экспериментальную силу при прокатке в начале, соответствующей длине полосы приблизительно равной длине дуги захвата  $l_d = 6,78 \text{ мм}$ ,  $P_{с1} = 31,25 \text{ (кН)}$ .

При сравнении рассчитанной  $P_{расч1} = 30,9 \text{ кН}$  с экспериментальной величиной силы прокатки на переднем участке полосы  $P_{с1} = 31,25 \text{ (кН)}$  ошибка составляет 1,11%.



Рисунок 3.5 – Распределение силы прокатки на переднем конце и начале деформирования основной части медной М0 полосы со смазкой СПЗ (6%)

- Вычислим давление и силу прокатки для средней точки 2 (с) (в установившемся периоде прокатки) при холодной прокатке медных полосы со смазкой СПЗ (6%):

Анализ кривых и уравнений, характеризующих упрочнение меди различных марок при холодной деформации, приведенных в работе [124] показал, что коэффициент упрочнения  $D > 0,4$ .

Определив, что коэффициент упрочнения при деформации меди М0 равен  $D = 0,64$ , поэтому расчет коэффициента  $n_b$  проводили по формуле (3.7):

$$n_b = \frac{\sigma_{\tau 0}}{\sigma_{\tau \text{cp}}} \frac{h_1}{h_{\text{cp}}} = \frac{44}{148,77} \cdot \frac{2,44}{2,75} = 0,26$$

Вычислим коэффициент  $n_\sigma$  по формуле (3.10):

$$n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{\text{cp}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{6,63}{2,73} \right)^{0,5} = 1,55$$

Определим величину коэффициента  $n_{\text{cp}}$  напряженного состояния полосы в установившийся период прокатки:

$$n_{\text{cp}} = \frac{2(1-\varepsilon)h_\gamma}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left( \left( \frac{h_\gamma}{h_1} \right)^\delta - 1 \right) = \frac{2(1-0,2026)2,73}{0,2026(1,59-1)2,44} \left( \left( \frac{2,73}{2,44} \right)^{1,59} - 1 \right) = 2,95$$

$$\text{где: } \delta = \frac{2fl_d}{\Delta h} = \frac{2 \cdot 0,074 \cdot 6,63}{0,62} = 1,59$$

Тогда среднее контактное давление на основном участке (2) полосы определяется по формуле (3.6):

$$p_{\text{cp}2} = 1,15\sigma_{\tau \text{cp}} n_{\text{cp}} (n_\sigma n_b)^{0,5} = 1,15 \cdot 148,77 \cdot 2,95 \cdot (1,55 \cdot 0,26)^{0,5} = 321,87 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Расчетная сила прокатки:

$$P_{\text{расч}2} = p_{\text{cp}2} F_2 = 321,87 \cdot 166,63 \approx 53633 \text{ (Н)} = 53,63 \text{ (кН)}$$

Экспериментальная сила прокатки  $P_{\text{э.мах}} = 50,22 \text{ (кН)}$  (см. рисунок 3.6)

Вычислим погрешность  $\Delta P$  расчета силы прокатки:

$$\Delta P_2 = \frac{P_{\text{э.мах}} - P_{\text{расч}2}}{P_{\text{э}2}} \cdot 100\% = \frac{50,22 - 53,63}{50,22} \cdot 100\% = -6,8\%$$

В этом случае, расчетная сила больше, чем экспериментальная сила прокатки, ошибка составляет  $-6,8\%$ .

- Вычислим давление и силу прокатки на заднем конце 3 (к) проката при холодной прокатки медной полосы со смазкой СПЗ (6%):

$$p_{\text{ср}3} = 1,15\sigma_{\text{ср}} = 1,15 \cdot 152,82 = 175,75 (\text{Н/мм}^2)$$

$$P_{\text{расч}3} = p_{\text{ср}3} F_3 = 175,75 \cdot 175,71 = 30881 (\text{Н}) \approx 30,88 (\text{кН})$$

Экспериментальная сила при прокатке заднего конца, соответствующая длине полосы  $l_1 - l_d = 245 - 6,84 = 238,16 \text{ мм}$ , равна  $P_{\text{э}3} = 30,86 (\text{кН})$  (см. рисунок 3.9). Погрешность расчета составляет  $-0,07\%$ .

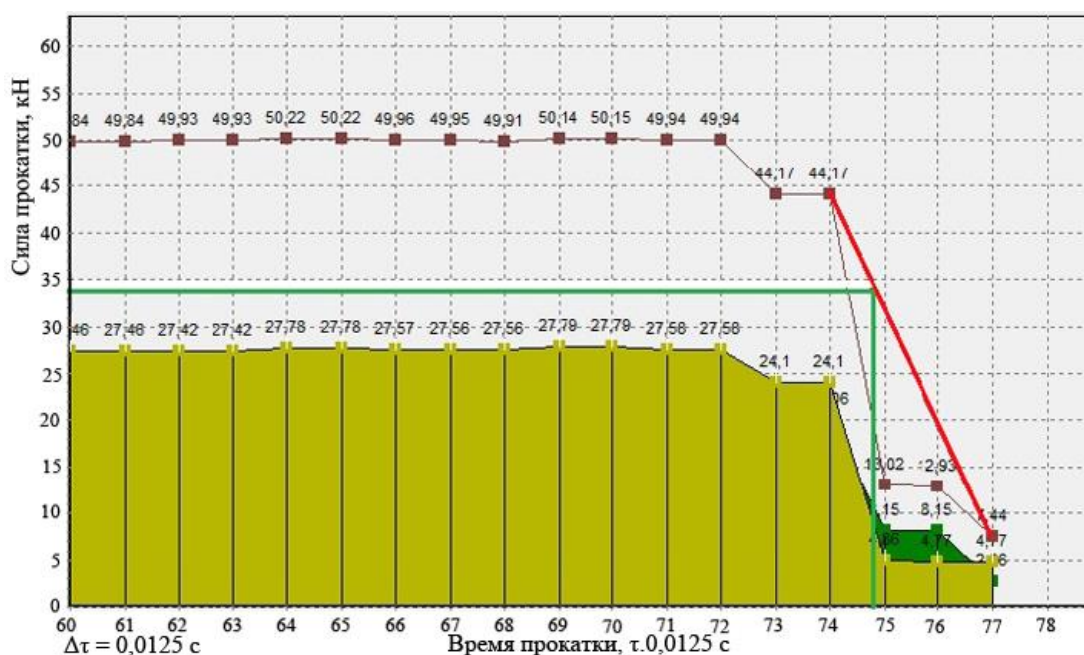


Рисунок 3.6 – Распределение силы прокатки на заднем конце при прокатке медной М0 полосы со смазкой СПЗ (6%)

Были выполнены аналогичные расчета силовых показателей прокатки по длине медных полос при применении различных смазочных материалов, которые приведены в таблице 3.1.

Анализ результатов расчета и эксперимента в таблице 3.1 показал, что погрешность расчетных значений сил прокатки находится в пределах от  $-6,8$  до  $2,87\%$  и математическое ожидание  $M(\Delta P)$  равно  $0,39$ , что указывает на адекватность предложенных уравнений для определения сил прокатки по длине

тонких медных полос.

Проверенная адекватность моделей позволяет рекомендовать блок-схему алгоритма расчета давления и сил прокатки по длине тонких полос из медных деформируемых сплавов.

Предложенные модели и алгоритм расчета могут быть использованы на листовых прокатных станах промышленных предприятий в том числе Российских и Вьетнамских, для проектирования рациональных технологических режимов прокатки медных полос и контроля нагрузок на прокатное оборудование.

### 3.3. Влияние условий контактного трения на потребляемую мощность при прокатке полос.

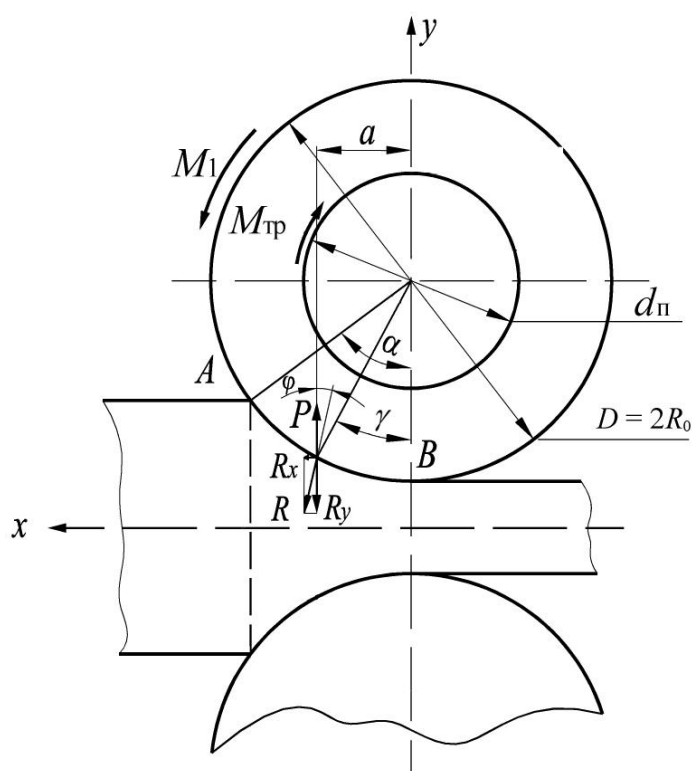


Рисунок 3.7 – Расчетная схема сил и моментов, действующих при холодной прокатке на двухвалковом стане

Уравнение равновесия моментов, действующих на каждый прокатный валок имеет вид [2]:

$$\Sigma M = M_1 - \frac{M_{\text{пр}}}{2} - M_{\text{тр}} = 0, \quad (3.12)$$

где:  $M_1$  – момент главного привода, который необходимо приложить к каждому валку для обеспечения процесса прокатки, кНм;  $M_{\text{пр}}$  – момент прокатки, кНм;  $M_{\text{тр}}$  – момент трения в подшипниках валка, кНм.

Из уравнения (3.11) значение момента  $M_1$  равняется

$$M_1 = \frac{M_{\text{пр}}}{2} + M_{\text{тр}}, \quad (3.13)$$

Суммарный рабочий момент:

$$M_p = 2M_1 = M_{\text{пр}} + 2M_{\text{тр}}, \quad (3.14)$$

Момент двигателя главного привода будет равен

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_p}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (3.15)$$

где:  $\eta_{\text{пр}}$  – коэффициент полезного действия (КПД) в линии главного привода;  $M_{\text{дв}}$  – суммарный момент прокатки (крутящий момент на валу двигателя), кНм. В этом случае  $\eta_{\text{пр}} = 0,85$  [12].

Для двухвалковых станов ориентировочные значения  $M_{\text{тр}}$  можно вычислить по формуле [12]:

$$M_{\text{тр}} = P f_{\text{тр.п}} d_{\text{п}}, \quad (3.16)$$

где:  $P$  – сила прокатки, кН;  $d_{\text{п}}$  – рабочий диаметр подшипника, мм;  $f_{\text{тр.п}}$  – коэффициент трения в подшипнике. Для подшипников жидкостного трения  $f_{\text{тр.п}} = 0,004$  [2].

Установив направление сил  $P$ , можно определить момент прокатки по формуле (см. рисунок 3.7) [4]:

$$M_{\text{пр}} = 2Pa, \quad (3.17)$$

где:  $P$  – сила прокатки, кН;  $a$  – плечо силы прокатки относительно оси вращения валка (кратчайшее расстояние от этой оси линии действия силы), мм.



$$a = R_0 \sin \gamma \approx R_0 \sqrt{\frac{h_0 - h_\gamma}{R_0}}, \quad (3.18)$$

где:  $\gamma$  – нейтральный угол, град.

Мощность прокатки на валу двигателя определяется по моменту прокатки и моменту трения для заданной скорости вращения. Для определения необходимой мощности двигателя главного привода  $N$  используют известную формулу механики [12]:

$$N = M_{\text{дв}} \omega = M_{\text{дв}} \frac{V}{R_0}, \quad (3.19)$$

где:  $N$  – мощность привода, кВт;  $\omega$  – угловая скорость валков,  $\text{с}^{-1}$ ;  $V$  – скорость прокатки,  $V = 0,25 \text{ м/с}$ ;  $R_0$  – радиус валков, м.

Из уравнений (3.16), (3.17) и (3.19) показано, что значение величина  $N$  зависит от силы и плеча силы по пропорциональному закону.

Результат расчета мощности прокатки на валу двигателя при холодной прокатке меди на двухвалковом стане с различными технологическими смазками представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результат расчета крутящего момента и мощность привода при холодной прокатки меди на лабораторном двухвалковом стане 150x235

Смазка	$h_0$ мм	$\varepsilon$ %	$h_\gamma$ мм	$P$ кН	$M_{\text{тр}}$ кНм	$M_{\text{пр}}$ кНм	$M_{\text{дв}}$ кНм	$N$ кВт
Пальмовое масло	3,05	21,31	2,71	49,61	0,016	0,481	0,603	2,131
СПЗ (6%)	3,06	20,26	2,73	50,27	0,016	0,484	0,607	2,143
И40 (5%)	3,06	19,93	2,74	51,06	0,016	0,489	0,614	2,168
Под. масло (5%)	3,06	19,61	2,74	52,11	0,017	0,490	0,616	2,174
Сухие валки	3,06	18,63	2,76	53,32	0,017	0,494	0,621	2,193

Из данных, которые приведены в таблице 3.2 можно построить график влияния контактного трения на мощность привода при холодной прокатке полос из меди на лабораторном двухвалковом стане 150x235 (рисунок 3.8).

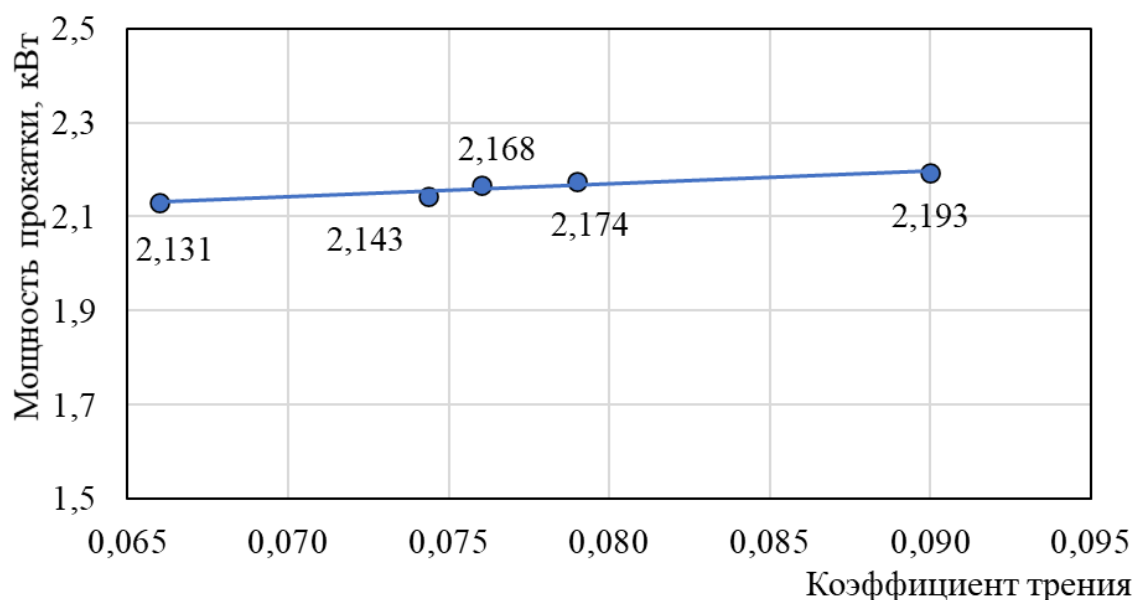


Рисунок 3.8 – Влияние условий контактного трения на мощность прокатки

Очевидно, что при применении технологических смазок мощность прокатки уменьшается от 2,193 кВт (сухие валки) до 2,131 кВт (пальмовое масло). По сравнению с прокаткой в сухих валках, разница мощности прокатки при применении технологических смазок составляет 0,063 кВт (2.8%). Наиболее эффективней является смазка пальмовым маслом.

Из анализа результата исследования можно учитывать эффективно использовать технологические смазки для оптимизации технологии процесса холодной листовой прокатки сплавов из меди на машиностроении заводе в городе Донг Най во Вьетнаме.

### Выводы по главе 3

1. Установлено, что применение технологических смазок при прокатке медных (М0) полос позволяет уменьшить силу прокатки до 7%, увеличить степень деформации до 3% и уменьшить толщину металла после прокатки примерно на 0,09 мм. Поэтому изменение условий контактного трения необходимо учитывать при настройке стана на прокатку полос заданной толщины.

2. Впервые установлено, что при прокатке со смазками разница между деформационными и силовыми показателями на концевых участках и в средней части меньше, чем при прокатке полос в сухих валках. Разница степени деформации концевых участков металла и средней части полос уменьшается от 2,03% и 1,96% при прокатке в сухих валках до 0,99% на переднем и 0,91% на заднем участках при прокатке со смазками. Неравномерность распределения сил прокатки уменьшается на 23,77 кН (44,6%) на переднем и 23,60 кН (44,3%) на заднем участках при прокатке в сухих валках до 17,99 кН (35,3%) и 17,10 кН (34,5%) соответственно при прокатке полос со смазками.

3. Установлено, что по сравнению с деформацией в сухих валках, сила при прокатке со смазками на переднем и заднем участках выше, чем при прокатке без смазки, разница составляет 0,58-2,57 кН и 0,51-2,79 кН соответственно. Напротив, в середине полос разница сил прокатки ниже – от 1,21 до 3,71 кН. Степени деформации в начальной и концевой зонах полос выше, чем при прокатке в сухих валках на 0,33-1,64% и 0,40-1,63%. В середине полос степень деформации тоже выше на 0,98-2,68%.

4. Экспериментально установлена применимость разработанных математических моделей для расчета давления и силы прокатки по длине полос на стационарных и неустановившихся участках. Разработана блок-схема алгоритма расчета давления и силы прокатки, учитывающая влияние внеконтактных и внешних частей полосы в установившейся период

деформирования. Результаты исследования позволяют рекомендовать разработанные методы расчета для повышения точности и надежности определения силовых показателей при холодной прокатки тонких полос из медных сплава на листовых станах завода во Вьетнаме и других предприятиях.

5. Установлено, что при применении технологических смазок мощность прокатки уменьшается примерно 3% по сравнению с прокаткой в сухих валках. Наиболее эффективней является технологическая смазка пальмовым маслом.

## Глава 4: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС ИЗ МЕДИ

Компьютерное моделирование процессов холодной прокатки применяется для исследования распределения силовых, энергосиловых параметров и особенностей формоизменения. Для компьютерного моделирования процессов холодной прокатки используются вычислительные среды конечно-элементного анализа [128, 129]. Отечественный программный продукт QForm широко применяли при моделировании процесса продольной холодной прокатки для оценки силовых, энергосиловых параметров и точности результатов исследования в лаборатории.

В этом случае программа QForm используется для оценки влияния прокатных смазок на силовые, энергосиловые параметры процесса холодной продольной прокатки полос из меди. Это позволяет установить режим для оптимизации технологии процесса холодной прокатки с уменьшением энергозатраты [130].

### 4.1. Построение модели материала и процесса прокатки в программе Qform 3D.

Свойство марки из меди M0 создано по следующим данным: Химический состав выбран по данным, которые представлены в таблице 2.1 (см. рисунок 4.1).

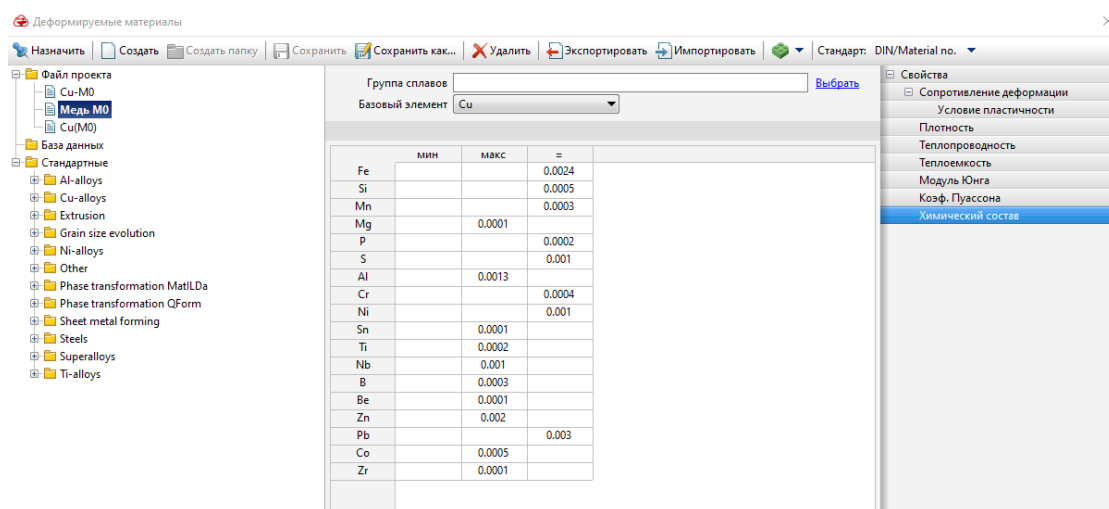


Рисунок 4.1 – Создание химического свойства марки из меди M0 в программе Qform

Средний кривой сопротивления деформации построены из трех кривых (кривой 4, 5, 6) сопротивления деформации при растяжении медных М0 полос на рисунке 2.7 для отожженных заготовок (см. рисунок 4.2).

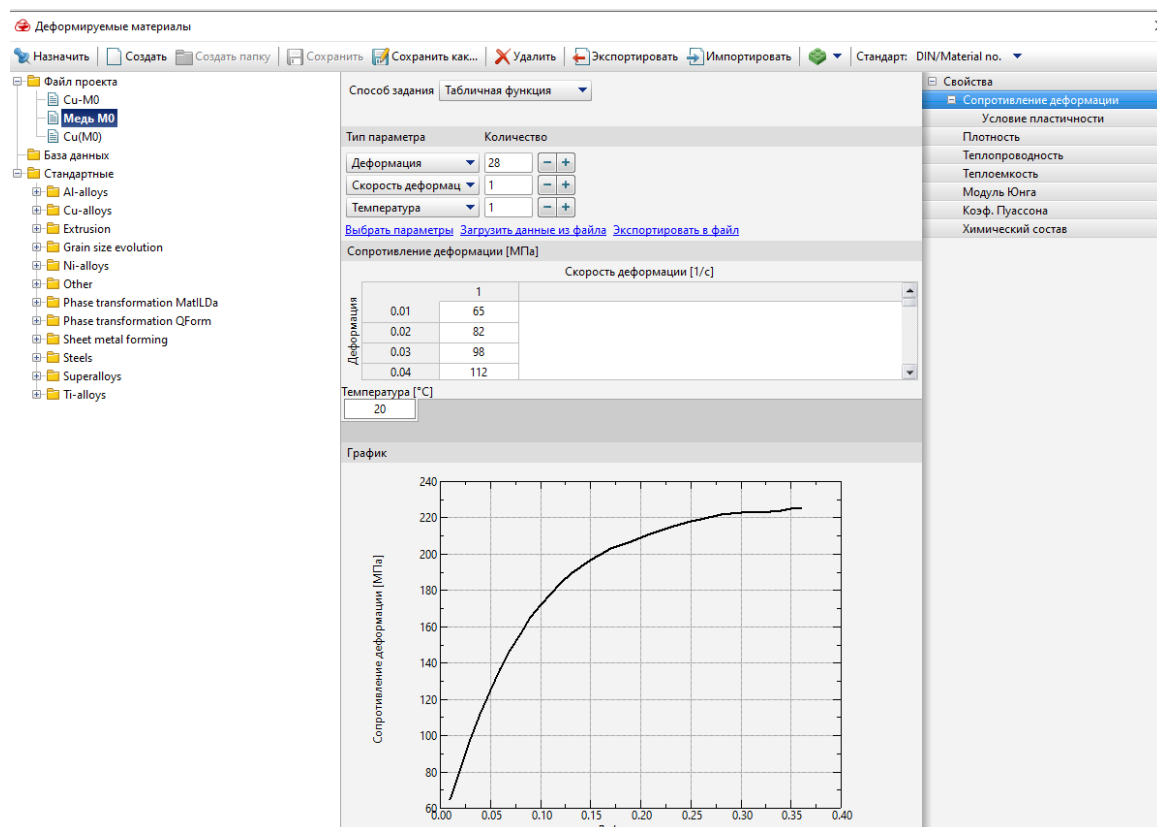


Рисунок 4.2 – Создание механического свойства марки из меди М0 в программе Qform

Другие свойства медного сплава М0 установлены по данным сплава «Cu-OFF; Cu99 cold» в библиотеке программы QForm 3D.

Моделирование процессов прокатки заготовок с начальными размерами 3x25x200мм из меди М0 выполнено в сухих валках и с четырьмя смазками: пальмовом маслом, прокатной смазкой СПЗ 6%, индустриальном маслом И40 5% и подсолнечном маслом 5%. В этом случае, обжатие образцов после прокатки равно 20%. Для этого зазор между валками  $S_0 = 2,4\text{мм}$ .

#### 4.2. Компьютерное моделирование процесса прокатки процесса прокатки полос из меди.

Смоделировали процесс холодной прокатки на двухвалковом стане с помощью программы QForm 3D. После моделирования сравнили изменение распределения силовых и энергосиловых показателей по длине полос при холодной прокатке с различными технологическими смазками.

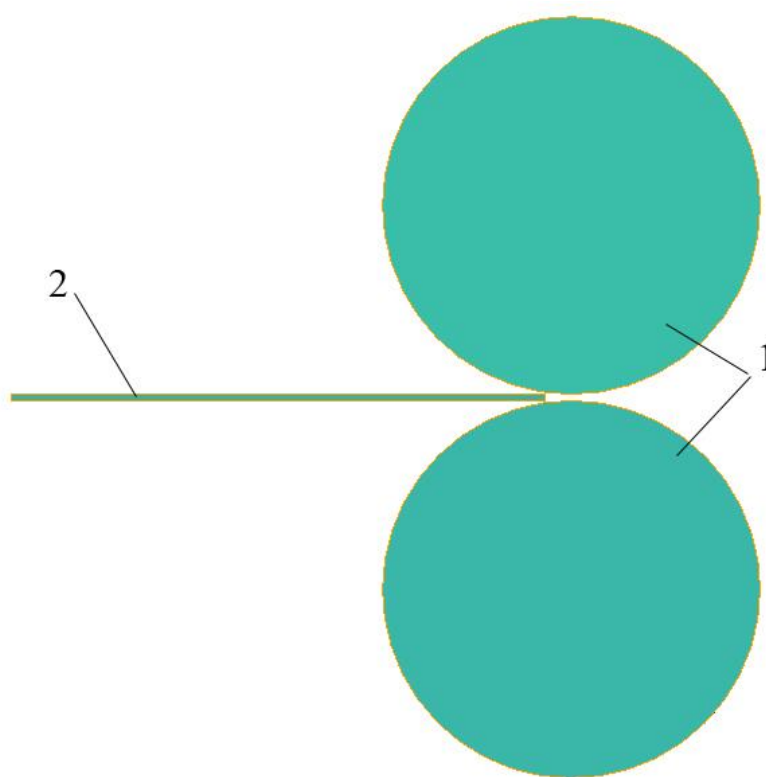


Рисунок 4.3 – Схема моделирования прокатки заготовки на лабораторном двухвалковом стане 150х235: 1 – валки; 2 – заготовка.

Компьютерное моделирование процессов двухвалковой прокатки создано в программе Autodesk Inventor, соответствующее с характеристиками лабораторного двухвалкового стана 150х235 (таблица 4.1) на кафедре «ОМД и АТ» Московского политехнического университета. Из библиотеки в программе QForm материал для валков был выбран по марке стали H10 HRC52. Конкретные параметры для

компьютерного моделирования процессов холодной прокатки полос из меди сплавов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Входные граничные данные процесса холодной прокатки медных полос в программе QForm 3D

Параметр			
Размеры валков	$R_0 = 70,8\text{мм}$	$L = 235\text{мм}$	
Размеры заготовки	$h_0 = 3\text{мм}$	$b_0 = 25\text{мм}$	$l_0 = 200$
Зазор между валками	$S_0 = 2,4\text{мм}$		
Смазка	Пальмовое масло	$f_{\text{тр}} = 0,066$	
	СПЗ (6%)	$f_{\text{тр}} = 0,074$	
	И40 (5%)	$f_{\text{тр}} = 0,076$	
	Под. масло (5%)	$f_{\text{тр}} = 0,079$	
	Сухие валки	$f_{\text{тр}} = 0,09$	
Температура валков	$20^0$		
Температура заготовки	$20^0$		
Материал валков	H10 HRC52		
Угловая скорость валков	36(об/мин)		
Время прокатки	5 (с)		

Расчет силовых и энергосиловых параметров выполнен в вычислительных средах конечно-элементного анализа по схеме процесса продольной прокатки (см. рисунок 4.4). Результаты расчета можно приводить графиками (см. рисунки 4.5 – 4.7) или сохранить в файл Excel.



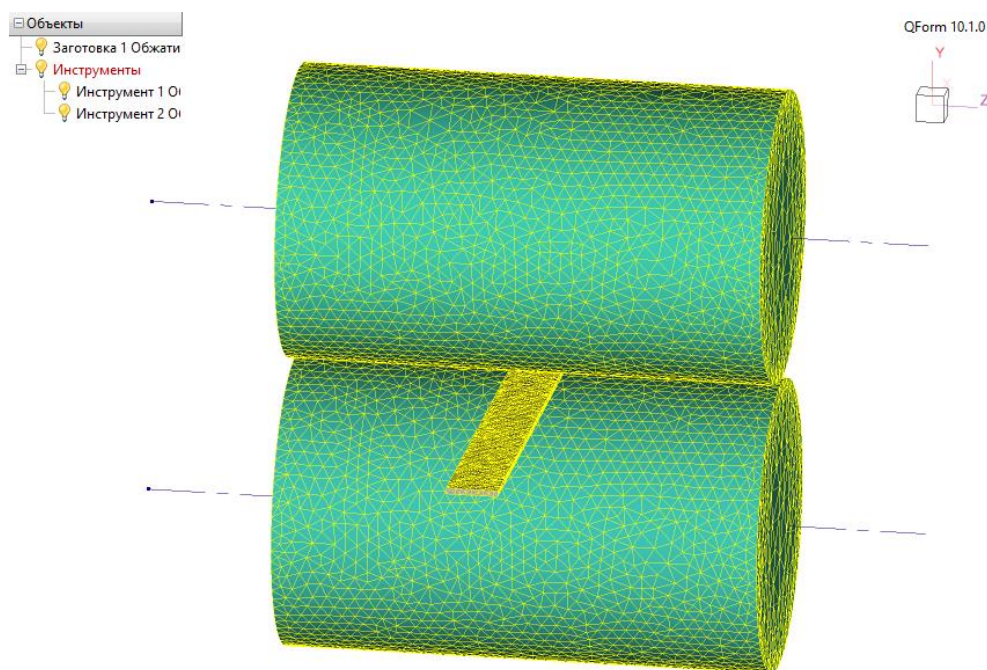


Рисунок 4.4 – Схема моделирования процесса холодной прокатки медного М0 полосы в программе QForm 3D

#### 4.3. Влияние технологических смазок на распределение силы и мощности при прокатке листовых заготовок.

Результаты исследования компьютерным моделированием позволяют точно оценить влияние технологических смазок на распределение силы и мощность по длине полос при холодной прокатке листовых заготовок из меди на лабораторном двухвалковом стане 150x235. С расчетными и экспериментальными результатами исследования в главе 3, эти результаты позволяют оптимизировать технологии процесса листовой прокатки по критерию минимума энергозатрат.

Из анализа графики результатов моделирования, представляющих на рисунках 4.5 – 4.7 можно опять делать вывод, что при применении технологических смазок силы, моменты и мощности прокати уменьшаются по сравнению с деформацией в сухих валках.

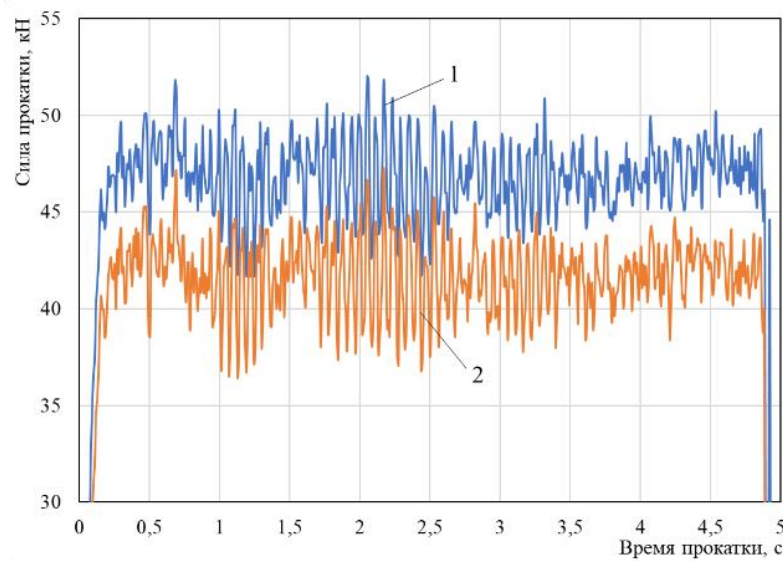


Рисунок 4.5 – Силы, действующие на одну валку при холодной прокатки полосы с обжатием 20% из меди М0 (кН): 1 – в сухих валках; 2 – с пальмовым маслом.

Максимальная сила прокатки уменьшается от 51,68 кН при прокатке образцов с обжатием 20% в сухих валках до 49,39 кН при смазке пальмовым маслом (рис. 4.5). В этом случае, максимальный момент прокатки уменьшается от 107,4 Нм до 80,7 Нм, а мощность привода при прокатке в сухих валках 0,4051 кВт уменьшает до 0,3043 кВт при смазке пальмовым маслом.

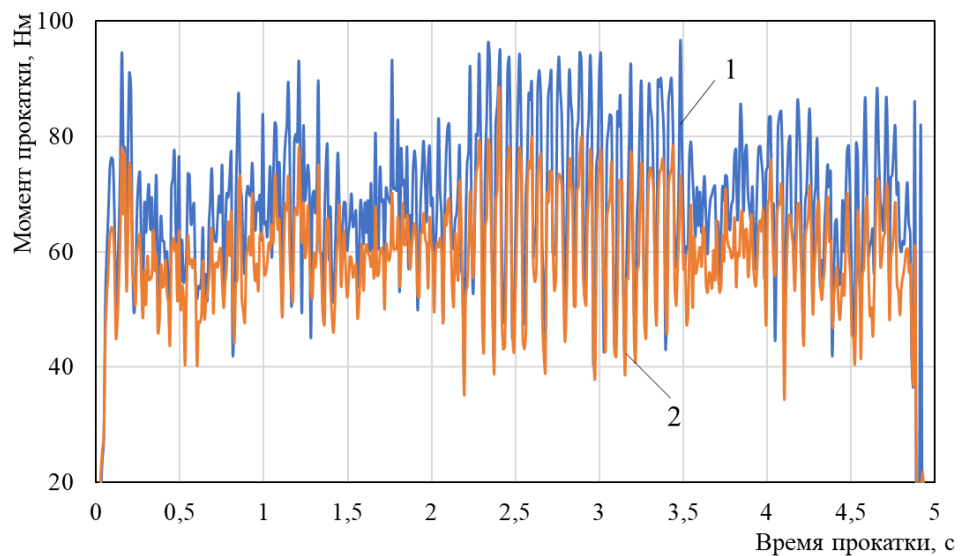


Рисунок 4.6 – Момент прокатки, прилагающий к одному валку при холодной прокатки полосы с обжатием 20% из меди М0 (Нм): 1 – в сухих валках; 2 – с пальмовым маслом.

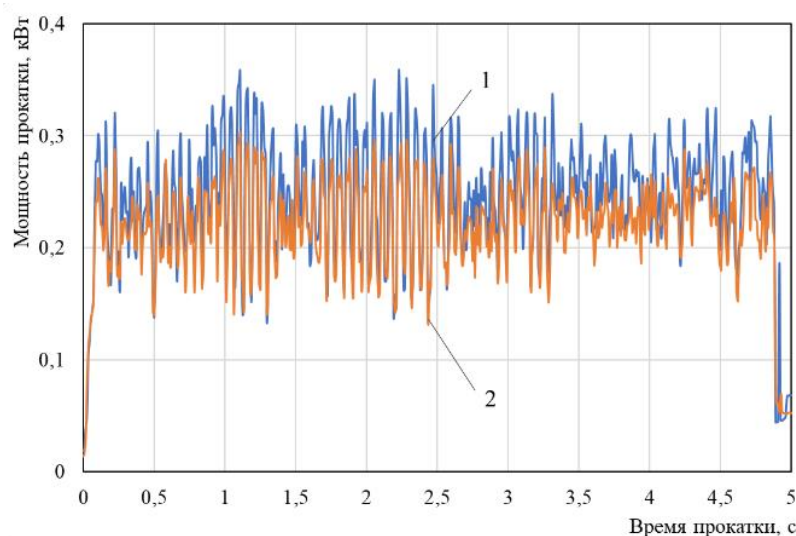


Рисунок 4.7 – Мощность прокатки при холодной прокатки полосы с обжатием 20% из меди М0 (Вт): 1 – в сухих валках; 2 – с пальмовым маслом.

Таблица 4.2 – Максимальные силовые и энергосиловые показатели при компьютерном моделировании процесса холодной прокатки медных М0 полос с помощью программы QForm 3D.

Смазка	Сила, кН	Момент, Нм	Мощность, кВт
Пальмовое масло	47,59	88,4	0,3163
Прокатная смазка (6%)	48,43	90,9	0,3202
Индустриальное масло (5%)	49,89	92,5	0,3311
Подсолнечное масло (5%)	50,68	93,8	0,3378
Сухие валки	52,02	96,7	0,3455

Анализ данных в таблице 4.2 показал, что наиболее эффективной является применение технологической смазки - пальмовое масло, по сравнению с прокаткой в сухих валках. При смазке пальмовым маслом разница составляет: силы прокатки 4,43 кН (8,5%), момента прокатки 8,3 Нм (8,58%) и мощности прокатки 0,0292 кВт (8,45%). Результаты процесса прокатки 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.**

Проведенное компьютерное моделирование процесса холодной прокатки полос из сплава меди М0 на двухвалковом стане 150х235 позволило показать, что при применении технологических смазок силовые и энергосиловые параметры уменьшаются по сравнению с деформацией полос в сухих валках. В том числе, наиболее эффективной является смазка пальмовым маслом. При смазке пальмовым маслом разница составляет: силы прокатки 4,43 кН (8,5%), момента прокатки 8,3 Нм (8,58%) и мощности прокатки 0,0292 кВт (8,45%). Анализ результатов компьютерного моделирования с помощью программы QForm 3D позволяет учитывать при разработке технологических режимов прокатки лент на машиностроительных заводах в Вьетнаме.

## **Глава 5: РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЛЕНТ ИЗ МЕДИ М0 НА ПРОМЫШЛЕННОМ ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ 175x300**

### **5.1. Исследование технологии прокатки и нагрузок на стане 175x300.**

На металлургических и машиностроительных заводах при изготовлении медных заготовок для листовой штамповки используется технология холодной прокатки полос и лент. Холодная прокатка тонких лент из медных сплавов в том числе сплава М0 проводится на двухвалковом стане 175x300 машиностроительного завода во Вьетнаме. После прокатки и отжига лент заготовки поступают на вертикальный пресс для листовой штамповки точных 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 – Прокатанный стан 175x300 на машиностроительном заводе города Донг Най, Вьетнам

На машиностроительном заводе в Донг Най (Вьетнам) процесс прокатки медных лент на двухвалковом стане 175x300 осуществляется при смазывании водой или в сухих валках. Анализ качества производимых лент показал, что иногда прокат не соответствует техническим требованиям заготовки для процесса листовой штамповки точных деталей: ленты изгибаются или толщина лент неравномерна по длине. Это приводит к материальным потерям и увеличению производственных затрат. Поэтому исследование и применение новых смазочных материалов имеет актуальное значение для повышения эффективности производства и качества листового прокатка. Результаты лабораторных исследований на двухвалковом стане 150x235 [121 – 126] позволили конкретизировать поиск рациональных режимов прокатки лент из меди М0 с различными технологическими смазками на двухвалковом стане 175x300.

Проектирование и усовершенствование процессов горячей и холодной прокатки профилей, труб, полос и лент проводится с использованием математических моделей и технологических решений, направленных на повышение точности проката, улучшение свойств и снижение нагрузок на оборудование [112 – 116]. Для проектирования и реализации рациональных режимов прокатки тонких лент из медного сплава М0 на стане холодной прокатки 175x300 использованы регрессионные уравнения и математические модели, представленные в работах [121, 124, 125]. Однако подтверждение рациональных режимов деформирования может быть получено после проведения и анализа опытных прокаток на промышленном стане.

Листовую прокатку образцов медных сплавов проходили на промышленном стане 175x300 типа LG300, происходящий из Китая. Параметры этого стана представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Параметры двухвалкового стана 175х300 холодной прокатки на промышленном заводе в городе Донг Най во Вьетнаме

ДВУХВАЛКОВЫЙ СТАН ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ZY175			
Тип	LG300	Мощность	DC.45 kW
Поверхность рулона	ФхL. 175х300мм	Электромашин тип	Z-200-31, 440V
Номинальное усилие прокатки	450 kN	Номинальная скорость	750 rpm
Скорость прокатки	0,04 – 0,43 м/с	Скорость режим	Постоянный крутящий
Толщина подачи	$\leq 2,5\text{ мм}$	Отрегулируйте диапазон скорость	75-750 rpm
Толщина готовой продукции	$\geq 0,3\text{ мм}$	Источник питания	АС.3х380V 50Hz
Серийный номер	04 – 59	Дата производства	2004.3
Название компании: Zhengzhou Jinghui Metallurgical Machinery Manufacturing Co., Ltd			

## 5.2. Исследование применимости результатов физического и компьютерного моделирования для совершенствования режимов прокатки на промышленном стане.

На двухвалковом стане 175х300 для прокатки лент толщиной 0,55мм используются заготовки толщиной 0,7мм, вырезанных из рулона. К медной ленте для листовой штамповки деталей предъявляются высокие требования по толщине и механическим свойствам. Отклонения по толщине не должно превышать  $\pm 0,01\text{ мм}$ .

Исходным материалом (подкатом) для прокатки и исследования послужили ленты размерами 0,7х20х2000 мм, полученные после продольной и поперечной

резки промышленных рулонных лент из медного сплава М0 на машиностроительном заводе в городе Донг Най.

Основные показатели механических свойств медных лент М0 определялись при проведении испытаний образцов на растяжение по ГОСТу 1497 – 84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [104]. В результате испытаний получена диаграмма растяжения образцов, характеризующая показатели основных механических свойств. Результаты испытания показали, что предел текучести лент в мягком состоянии изменяется от 47 до 52 МПа, временное сопротивление в диапазоне 222 – 227 МПа, относительное удлинение от 59,5 до 61,5%.

Опытные прокатки лент провели на двухвалковом стане 175х300 с фактическим диаметром валков 167 мм и скоростью прокатки 0,272 м/с. 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 точных деталей. Толщина по длине лент после прокатки должно соответствовать диапазону  $0,55 \pm 0,01$  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.

До листовой штамповки выполнили отжиг медных лент. Отжиг обеспечивает благоприятную пластическую обработку медных лент, уменьшает твердость заготовок. С целью удаления окалины на поверхности лент после отжига травление проводят в растворе серной кислоты при температурах раствора 50 – 60°C. После травления необходимо многократная промывка в проточной воде и сушка [90].

На стане 175х300 прокатали 20 опытных лент на толщину 0,55 мм из медного сплава М0 из подката размерами 0,7х20х2000 мм с разными условиями смазывания, в том числе: 5 лент в сухих валках (без смазки); 5 лент при подаче



воды на валки; 5 лент – со смазкой индустриальным маслом И40 (5%) и 5 лент – со смазкой индустриальным маслом И20 (5%). Расчет коэффициента контактного трения  $f_{тр}$  проводили по формуле (3.1) А.П. Грудева.

Ниже приведены значения переменных входящих в уравнение (3.1) при определении коэффициента трения с применением минеральных смазок на стане 175х300:

Таблица 5.2. Условия контактного трения при холодной прокатке медных лент на стане 175х300

Смазки	$R_z$ , мкм	$v_{50}$ , $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-2}$	$K_{см}$	$v$ , м/с	$f_{тр}$
И40	3,2	35	1,4	0,269	0,076
И20	3,2	23	1,4	0,274	0,074

Определение коэффициента трения проводили с учетом фактической кинематической вязкости смазки; максимальной высоты микронеровностей на поверхности бочки валка; окружной скорости бочки валков на стане 175х300 и коэффициента  $K_m$ , учитывающий влияние вида и состава смазки [118].

Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения: со смазкой валков индустриальным маслом И20 (5%) –  $f_{тр} = 0,074$ ; с И40 –  $f_{тр} = 0,076$ ; с водой –  $f_{тр} = 0,085$  [131]. При холодной прокатке меди в сухих валках коэффициент трения составляет  $f_{тр} = 0,09$  [13].

Процесс холодной прокатки медных лент выполнен по двум и трем проходам. Количество проходов выбиралось в зависимости от качества (точность и механические свойства) лент после прокатки. Разработанный технологический процесс при прокатке лент из медного сплава М0 на стане 175х300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам) приведен на рисунке 5.2.

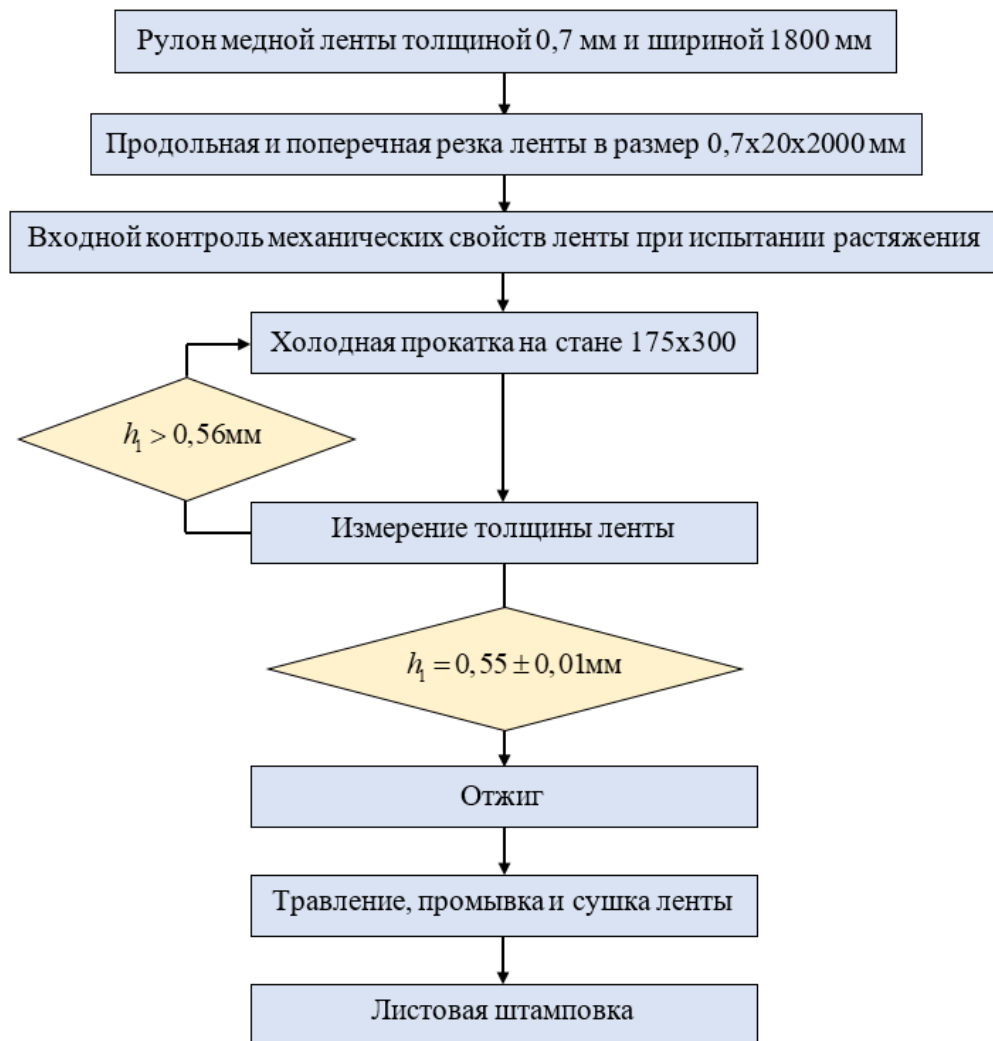


Рисунок 5.2 – Технологическая схема режимы производства лент для листовых штамповок точных деталей на машиностроительном заводе в городе Донг Най во Вьетнаме.

Основные результаты опытных прокаток на стане 175x300 и расчёты приведены в таблице 5.3, включая параметры и показатели процесса прокатки:  $h_0$ ,  $h_1$  – толщина лент до и после прокатки, мм;  $\varepsilon_\Sigma = 100\% \cdot \sum_{i=1}^n \Delta h_i / h_0$  – суммарное относительное обжатие, %;  $\sigma_{т0}$ ,  $\sigma_{т1}$  – предел текучести лент до и после прокатки, МПа;  $\sigma_{в0}$ ,  $\sigma_{в1}$  – временное сопротивление лент до и после прокатки, МПа;  $P$  – значение силы прокатки в начале (1), в середине (2) и в конце (3) длины каждой ленты, кН; а также  $N$  – мощность прокатки, кВт. Приведенные в таблице 5.3 показатели механических свойств лент, силы и мощности прокатки определялись по формулам, которые приведены в работах [121 – 126].

Таблица 5.3. Силовые, деформационные и энергосиловые показатели при холодной прокатки медных лент на промышленном стане 175x300.

Смазка $f_{тр}$	Проход	Место	$h_0$ мм	$h_1$ мм	$\Delta h$ мм	$\varepsilon$ %	$\sigma_{т0}$ МПа	$\sigma_{т1}$ МПа	$\sigma_{в0}$ МПа	$\sigma_{в1}$ МПа	P кН	N кВт
Сухие валки	1	1 (н)	0,71	0,61	0,10	14,08	50	216,0	224	253,6	14,30	0,373
		2 (с)	0,70	0,62	0,08	11,43	50	195,3	224	245,4	22,06	
		3 (к)	0,71	0,61	0,10	14,08	50	216,0	224	253,6	14,76	
	2	1 (н)	0,61	0,57	0,04	20,64	216,0	262,1	253,6	277,5	11,67	0,189
		2 (с)	0,62	0,59	0,03	16,27	195,3	232,1	245,4	261,0	18,52	
		3 (к)	0,61	0,57	0,04	20,64	216,0	262,1	253,6	277,5	11,67	
	3	1 (н)	0,57	0,54	0,03	25,91	262,1	295,2	277,5	300,0	11,45	0,273
		2 (с)	0,59	0,55	0,04	23,05	232,1	277,6	261,0	287,4	23,86	
		3 (к)	0,57	0,55	0,02	24,15	262,1	284,5	277,5	292,2	11,13	
Вода	1	1 (н)	0,71	0,6	0,11	15,49	50	226,5	224	258,3	14,77	0,367
		2 (с)	0,7	0,61	0,09	12,86	50	206,6	224	249,7	21,73	
		3 (к)	0,7	0,59	0,11	15,71	50	228,1	224	259,0	14,87	
	2	1 (н)	0,6	0,56	0,04	22,16	226,5	271,9	258,3	283,7	12,13	0,179
		2 (с)	0,61	0,58	0,03	17,78	206,6	242,7	249,7	266,4	17,57	
		3 (к)	0,59	0,55	0,04	22,49	228,1	274,0	259,0	285,1	12,21	
	3	1 (н)	0,56	0,54	0,02	25,73	271,9	294,2	283,7	299,2	9,33	0,222
		2 (с)	0,58	0,55	0,03	22,95	242,7	276,9	266,4	287,0	21,79	
		3 (к)	0,55	0,54	0,01	24,31	274,0	285,5	285,1	292,9	6,40	
И40 (5%)	1	1 (н)	0,71	0,59	0,12	16,90	50	236,6	224	263,2	15,74	0,302
		2 (с)	0,7	0,6	0,10	14,29	50	217,6	224	254,2	20,35	
		3 (к)	0,7	0,58	0,12	17,14	50	238,3	224	264,1	15,36	
	2	1 (н)	0,59	0,55	0,04	23,68	236,6	281,5	263,2	290,1	12,57	0,193
		2 (с)	0,6	0,56	0,04	20,95	217,6	264,1	254,2	278,7	16,87	
		3 (к)	0,58	0,54	0,04	24,04	238,3	283,8	264,1	291,7	12,65	
И20 (5%)	1	1 (н)	0,7	0,58	0,12	17,14	50	238,3	224	264,1	15,38	0,290
		2 (с)	0,7	0,59	0,11	15,71	50	228,1	224	259,0	20,04	
		3 (к)	0,7	0,58	0,12	17,14	50	238,3	224	264,1	15,37	
	2	1 (н)	0,58	0,54	0,04	24,04	238,3	283,8	264,1	291,7	12,67	0,189
		2 (с)	0,59	0,55	0,04	22,49	228,1	274,0	259,0	285,1	16,52	
		3 (к)	0,58	0,54	0,04	24,04	238,1	283,8	264,1	291,7	12,66	

На основании результатов исследований были построены графики влияния различных условий контактного трения на формирование толщины, деформационно-силовые и энергетические (мощность) показатели при холодной прокатки по длине медных лент на промышленном стане 175х300.

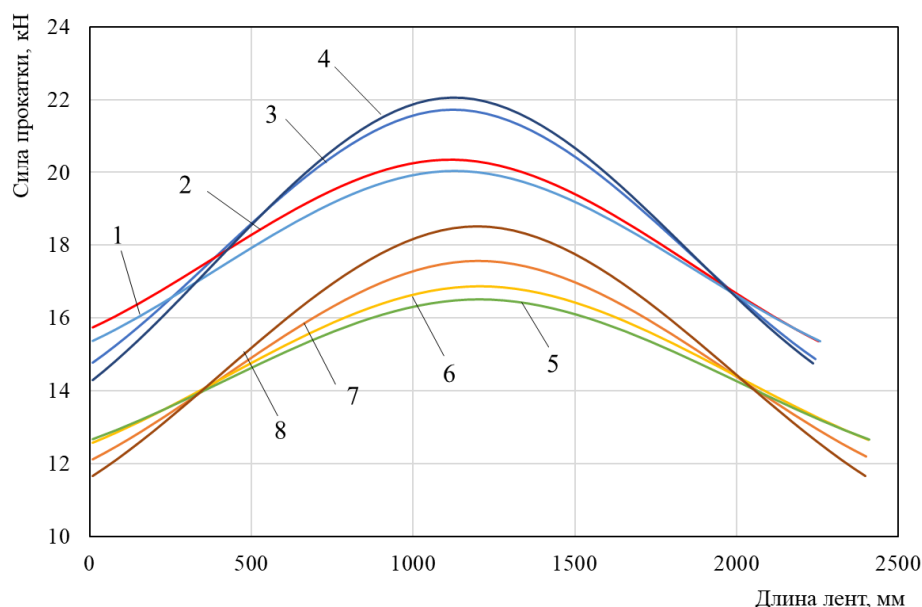


Рисунок 5.3 – Влияние технологических смазок на силовые показатели при холодной прокатки по длине медных лент в первом (кривые 1 – 4) и втором (кривые 5 – 8) проходе на стане 175х300: 1, 5 – индустриальное масло И20; 2, 6 – индустриальное масло И40; 3, 7 – вода; 4, 8 – сухие валки.

По результатам исследований, приведенных на рисунке 5.3 видно, что применение технологических смазок при холодной прокатке медных лент на стане 175х300 позволяет снизить силовые показатели прокатки [131]. В первом проходе максимальная сила прокатки снижается на 9,16% с 22,06 кН до 20,04 кН при смазке индустриальным маслом И20 (5%) и на 7,75% с 22,06 кН до 20,35 кН при смазке индустриальным маслом И40 (5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках. По сравнению со смазкой водой сила уменьшается на 7,78% с 21,73 кН до 20,04 кН при смазке И20 (5%) и на 6,35% с 21,73 кН до 20,35 кН при смазке И40 (5%). Во втором проходе максимальная сила прокатки снижается на 10,8% с 18,52 кН до 16,52 кН при смазке И20 (5%) и на 8,9% с 18,52 кН до 16,87 при смазке И40

(5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках. По сравнению со смазкой водой сила уменьшается на 5,98% с 17,57 кН до 16,52 кН при смазке И20 (5%) и на 3,98% с 17,57 кН до 16,87 при смазке И40 (5%).

Неравномерность распределения сил прокатки по длине лент при применении смазки И20 уменьшается с 35,2% до 23,3% (в первом проходе) и с 37% до 23,3% (во втором проходе) по сравнению с прокаткой в сухих валках.

А при смазке И40 неравномерность распределения сил прокатки по длине лент снижается с 32% до 23,3% (в первом проходе) и с 31% до 23,3% (во втором проходе) по сравнению с деформацией в сухих валках.

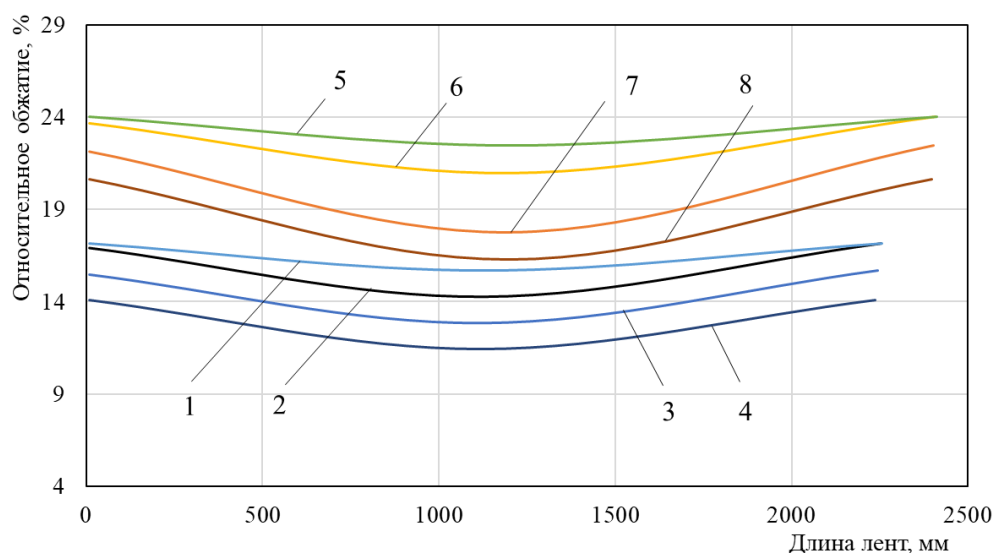


Рисунок 5.4 – Влияние технологических смазок на распределение обжатий по длине медных лент в первом (кривые 1 – 4) и во втором (кривые 5 – 8) проходе при холодной прокатке на стане 175х300: 1, 5 – индустриальное масло И20; 2, 6 – индустриальное масло И40; 3, 7 – вода; 4, 8 – сухие валки.

Суммарная относительная деформация ленты (рисунок 5.4) при смазке индустриальным маслом И20 (5%) больше, чем при прокатке в сухих валках на 4,28% (в первом проходе) и на 6,22% (во втором проходе). По сравнению со смазкой водой степень деформации ленты при смазке индустриальным маслом И20 (5%) увеличивается на 2,85% с 12,86 до 15,71% (в первом проходе) и на

4,71% с 17,78 до 22,49% (во втором проходе).

Степень деформации ленты при смазке индустриальным маслом И40 (5%) повышается по сравнению с прокаткой в сухих валках на 2,86% (в первом проходе) и на 4,68% (во втором проходе). По сравнению со смазкой водой степень деформации ленты при смазке индустриальным маслом И40 (5%) увеличивается на 1,43% с 12,86 до 14,29% (в первом проходе) и на 3,17% с 17,78 до 20,95 (во втором проходе).

Неравномерность распределения относительной деформации ( $\Delta\epsilon$ ) по длине лент при применении смазки И20 (5%) существенно уменьшается с 2,65 до 1,43% (в первом проходе) и с 4,37 до 1,55% (во втором проходе) по сравнению с прокаткой в сухих валках. По сравнению со смазкой водой неравномерность распределения степени деформации по длине ленты при смазке индустриальным маслом И20 (5%) уменьшается с 2,64 до 1,43% (в первом проходе) и с 4,71 до 1,55% (во втором проходе).

По сравнению с прокаткой в сухих валках, неравномерность распределения степени деформации по длине лент при применении смазки И40 (5%) увеличивается незначительно с 2,65% до 2,86% (в первом проходе), а уменьшается с 4,37% до 3,09% (во втором проходе). По сравнению со смазкой водой неравномерность распределения степени деформации по длине ленты при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) одинакова и равна 2,86% (в первом проходе) и уменьшается с 4,71% до 3,09% (во втором проходе).

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 рисунке 5.5 приведено распределение средней толщины по длине ленты после второго прохода при прокатке лент из медного сплава М0 с разными условиями смазывания. Толщину лент измерили с шагом 100 мм по длине.

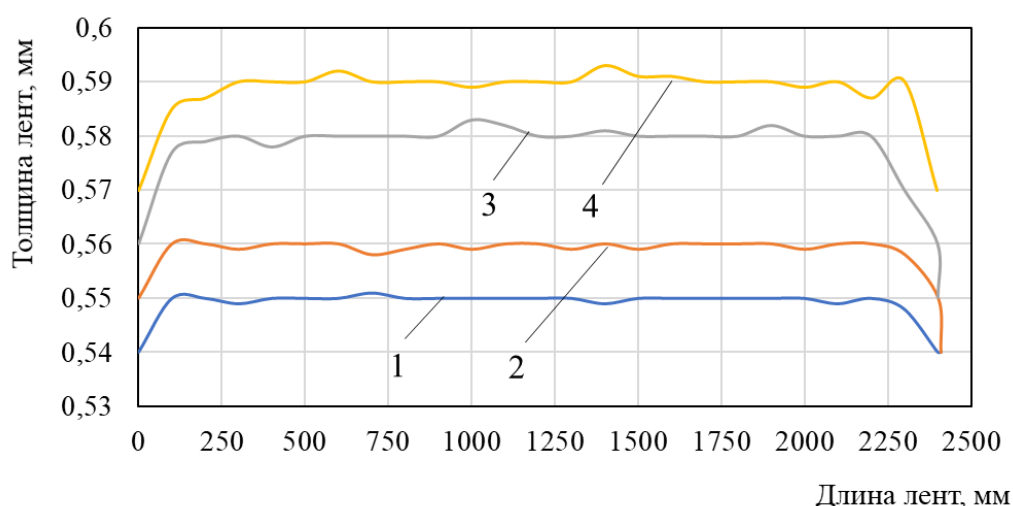


Рисунок 5.5 – Распределение толщины по длине медных лент после второго прохода при холодной прокатки на стане 175x300 с разными условиями смазывания: 1 – индустриальное масло И20 (5%); 2 – индустриальное масло И40 (5%); 3 – вода; 4 – сухие валки.

Из рисунка 5.5 видно, что распределение толщины по длине медных лент после второго прохода при смазке индустриальным И20 (5%) и индустриальным маслом И40 (5%) более равномерно, чем в сухих валках или со смазкой водой. В основной части проката толщина (кривые 1 и 2 на рисунке 5.5) практически одинакова или с незначительным изменением. Заметим, что толщина лент по всей длине после второго прохода прокатки (на выходе из стана) со смазками И20 (5%) и И40 (5%) находится в диапазоне 0,54 – 0,56 мм. Это соответствует техническим требованиям для листовой штамповки точных деталей ( $h_l = 0,55 \pm 0,01$  мм) машиностроительного завода в г. Донг Най. А при прокатке в сухих валках или с водой толщина по длине лент после второго прохода не обеспечивает требования по точности ( $h_l > 0,56$  мм), поэтому в этом случае нужен третий проход. Таким образом, при применении технологических смазок индустриальным маслом И20 (5%) и И40 (5%) на стане 175x300 позволяет уменьшить количество проходов прокатки лент с 3 до 2 и обеспечивать требуемую точность толщины ленты.

На рисунке 5.6 показано влияние условий контактного трения на мощность

прокатки лент.

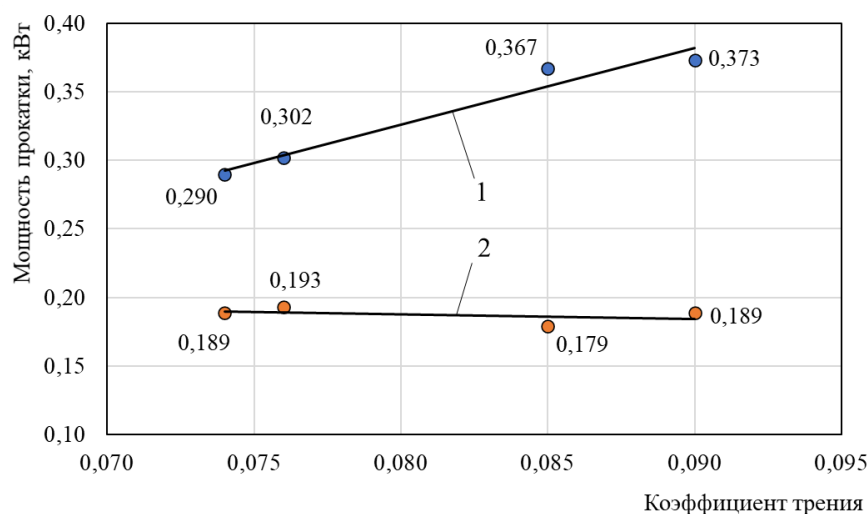


Рисунок 5.6 – Влияние контактного трения при различных технологических смазках на мощность при холодной прокатки медных лент на стане 175х300: 1 – максимальная мощность прокатки в первом проходе; 2 – максимальная мощность прокатки во втором проходе

В первом проходе максимальная мощность прокатки при смазке индустриальным маслом И20 (5%) снижается на 22,25% с 0,373 кВт до 0,290 кВт по сравнению с прокаткой в сухих валках. По сравнению со смазкой водой максимальная мощность прокатки при смазке индустриальным маслом И20 (5%) снижается на 20,98% с 0,367 кВт до 0,290 кВт. Максимальная мощность прокатки при смазке валков И40 (5%) снижается на 19,03% с 0,373 кВт до 0,302 кВт по сравнению с прокаткой в сухих валках. По сравнению со смазкой водой максимальная мощность прокатки при смазке индустриальным маслом И40 (5%) снижается на 17,71% с 0,367 кВт до 0,302 кВт.

Во втором проходе максимальная мощность прокатки при смазке индустриальными маслами И20 (5%) или И40 (5%) изменяется не значительно по сравнению с прокаткой в сухих валках или с водой. Применение индустриальных смазок увеличивает обжатие ленты и длину очага деформации, которая приводит



к росту момента и мощности прокатки. Максимальная мощность прокатки изменяется в диапазоне 0,179 – 0,193 кВт.

Сумма мощностей прокатки при смазке индустриальным маслом И20 (0,562 кВт) в 1,17 раза ниже, чем в сухих валках (0,479 кВт) и в 1,14 раза ниже, чем с водой (0,546 кВт). При смазке индустриальным маслом И40 суммарная мощность прокатки ниже, чем в сухих валках 1,14 раза и ниже, чем с водой 1,1 раза. Результаты исследования позволили разработать и опробовать технологию холодной прокатки медных лент со смазкой И20 или 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. Установлено, что применение технологических смазок индустриальным маслом И20 (5%) или И40 (5%) на промышленном двухвалковом стане 175х300 позволяет уменьшить силу прокатки на 4 – 10% и увеличить обжатие лент на 1,43 – 6,22%. Это обеспечивает возможность сокращения количества проходов при прокатке лент на стане с трех до двух и заданную точность толщины ленты для листовой штамповки деталей.

2. Результаты исследований позволили разработать рациональные режимы прокатки медных лент из сплава М0 с уменьшением неравномерности распределения по длине проката сил прокатки с 37% до 23% и относительных обжатий с 4,71% до 1,55%, а толщины по всей длине лент находится в диапазоне 0,54 – 0,56 мм при применении технологических смазок индустриальным маслом И20 (5%) или И40 (5%) на промышленном двухвалковом стане 175х300. Установлены количественные закономерности о влиянии технологических смазок на распределение параметров прокатки по длине медных лент.

3. Разработка и внедрение новых режимов прокатки с применением технологических смазок индустриальным маслом И20 или И40 на двухвалковом стане 175х300, обеспечило заданную точность толщины 0,55мм по длине лент при значительном сокращении времени на деформацию и снижении расходов (17 – 22%) на электроэнергию на машиностроительном заводе в г. Донг Най во Вьетнаме.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлены закономерности изменения прочностных и пластической характеристик от степени холодной деформации полос меди М0 известного химического состава. Получены адекватные регрессионные уравнения для расчета предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения медного сплава М0 при прокатке полос и лент с обжатием до 30%.

2. Установлены закономерности изменения твердости от обжатия медных (М0) полос при холодной прокатке. Получены уравнения для расчета величин твердости по Бринеллю (НВ) и Виккерсу (НV) от степени деформации.

3. Построены графики и получены зависимости основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от показателей твердостей (НВ и НV) прокатанных полос из меди М0. Полученные регрессионные уравнения позволяют определять основные показатели механических свойств медных (М0) лент по твердостям (НВ и НV) с высокими коэффициентами корреляции.

4. Установлены закономерности влияния условий контактного трения на формирование деформационных, силовых показателей прокатки и толщину медных М0 полос 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 меди М0.

6. Усовершенствована математическая модель и алгоритм расчета среднего давления и силы прокатки, обеспечивающие повышение точности определения параметров холодной прокатки по длине тонких полос и лент.

7. Применение компьютерного моделирования с помощью программы QForm 3D позволило определить не контролируемые параметры по длине раската

и спроектировать рациональные технологические режимы холодной прокатки лент на промышленном стане.

8. Разработаны и внедрены новые режимы холодной прокатки медных лент на стане 175х300 с 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.

## Список литературы

1. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М: Металлургия, 1986. – 430 с.
2. Шаталов, Р.Л. Проектирование параметров процессов листовой прокатки: Учебное пособие / Р.Л. Шаталов. – М: Московский Политех, 2018. – 184 с.
3. Николаев, В.А. Теория процессов прокатки: Учеб. Пособие / В.А. Николаев. – К: УМК ВО, 1991. – 148 с.
4. Мазур, В.Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ технические приложения) / В.Л. Мазур, А.В. Ноговицын. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 493 с.
5. Куприн, М.И. Основы теории прокатки: Издание 2-е, переработанное и дополненное / М.И. Куприн, М.С. Куприна. – М: Металлургия, 1978. – 185 с.
6. Радченко, А.К. Роль трения при несимметричной прокатке / А.К. Радченко, К.А. Гогаев // Киев: Серія Машинобудування. – 2013. – № 67. – С. 168-173.
7. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: Справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. Изд. – М: Металлургия, 1982. – 312 с.
8. Грудев, А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П. Грудев. – М: Металлургия, 1973. – 288 с.
9. Гарбер, Э.А. Теория прокатки: Учеб. Для студентов вузов / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова. – Череповец: ЧГУ. М: Теплотехник, 2013. – 306 с.
10. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки: Учебник для студентов машиностроительных и металлургических вузов / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М: металлургия, 1980. – 320 с.
11. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченков. – М: Машиностроение, 1978. – 208 с.
12. Никитин, Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. Пособие / Г.С. Никитин. – М: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2009. – 399 с.

13. Целиков, А.И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков., А.Д. Томленов, В.И. Зюзин, А.В. Третьяков, Г.С. Никитин. – М: Металлургия, 1982. – 335 с.
14. Иванов, К.М. Механика процессов обработки давлением: Учебник пособие / К.М. Иванов, Н.И. Нестеров, Д.В. Усманов. – Балт. гос. техн. Ун-т. СПб, 2012. – 299 с.
15. Ионов, С.М. Влияние глубины очистки базовых масел на эффективность смазок для холодной листовой прокатки / С.М. Ионов, А.Н. Крюков, С.А. Зиненко, В.И. Канторович // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М: МОО «Объединение прокатчиков», ОАО "Черметинформация", 2004. – С. 111-113.
16. 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.
17. Голенков, В.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь. – М: Машиностроение, 2009. – 442 с.
18. Лежнев, С.Н. Теоретические основы обработки металлов давлением: Учебное пособие / С.Н. Лежнев. – Темиртау: КГИУ, 2013. – 124 с.
19. Булыжев, Е.М. Прокатка листового металла. Часть 1: Учебное пособие для студентов / Е.М. Булыжев, В.Н. Кокорин, Ю.А. Титов, А.А. Григорьев. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 186 с.
20. Ионов, С.М. Оценка технологической смазки и условий трения при холодной прокатке и волочении / С.М. Ионов, В.И. Канторович, С.А. Шеповалов, А.Н. Крюков // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології», – 2005. – С. 224-228.
21. Шевакин, Ю.Ф. Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М: Инт. Инжиниринг, 2013. – 496 с.

22. Гарбер, Э.А. Совершенствование методов расчета напряжений трения при дрессировке холоднокатаной отожженной стальной полосы / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева // Производство проката. – 2017. – №10. – С.15-20.
23. Белосевич, В.К. Эмульсии для холодной прокатки (Методика разработки составов эмульсий) // В.К. Белосевич, С.М. Ионов // Производство проката. –1999. – №8. – С. 3-6.
24. Белосевич, В.К. Оценка технологических смазок для холодной прокатки листов с помощью комплексного критерия эффективности / В.К. Белосевич, С.М. Ионов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 9. – С. 36-38.
25. Гарбер, Э.А. Уточнение зависимости коэффициента трения при холодной прокатке от факторов технологического процесса методами регрессионного анализа / Э.А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов // Металлургия. – 2009. – С. 118-124.
26. Грудев, А.П. Теория прокатки / А.П. Грудев. – М: Металлургия, 1988. – 240 с.
27. Грудев, А.П. Теория прокатки: Изд. 2-е, перераб. И доп. / А.П. Грудев. – М: Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
28. 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 // Изд. ТулГУ. – 2019. Вып. – 12. – С. 125-127.
29. Баранов, Г.Л. Совершенствование расчета контактных напряжений при прокатке полосы / Г.Л. Баранов // Сталь. – 2015. – №6. – С. 34-39.
30. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – М: Металлургия, 1986. – 688 с.
31. 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.
32. Люленков, В.И. Создание износостойких поверхностей пар трения, работающих в условиях жидкостной и граничной смазки / В.И. Люленков, С.В.

Полущук, А.Г. Никитин // Черная металлургия. – 2017. – Том 60. – №2. – С. 124-127.

33. Никитин, Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки / Г.С. Никитин. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 401 с.

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

35. Мазур, В.Л. Механизм смазочного действия эмульсий при прокатке: научные основы, результаты экспериментов, промышленная практика / В.Л. Мазур, В.И. Тимошенко // Сталь. – 2017. – №7. – С. 24-32.

36. Лель, Р.В. Оптимизация процесса холодной листовой прокатки / Р.В. Лель, В.М. Двинский, В.А. Рудаков. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – 130 с.

37. Ягудин, И.В. Исследование закономерностей контактного трения в очаге деформации при холодной прокатке стальных полос повышения эффективности работы широкополосных станов: Диссертация на соискание ученой кандидата технических наук / И.В. Ягудин. – Череповец: 2016. – 115 с.

38. Белосевич, В.К. Определение положения нейтрального сечения при холодной листовой прокатке / В.К. Белосевич, С.М. Ионов, Е.А. Фридкин // Производство проката. – 1999. – №3. – С. 5-8.

39. Николаев, В.А. Характеристики контактного трения при прокатке полос / В.А. Николаев // Сталь. – 2018. – №7. – С. 22-28.

40. Манохина, Н.Г. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на качество сварных стальных труб / Н.Г. Манохина, Р.Л. Шаталов, И.В. Чурсин, А.В. Любимов // Черная металлургия. – 2017. – №3. – С. 46-52.

41. Сафьян, М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство: Учебник / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. – К: Выща школа. Головное изд-во, 1988. – 351 с.

42. Мазур, В.Л. Эффекты технологической смазки при холодной прокатке и волочении труб / В.Л. Мазур // Сталь. – 2018. – №10. – С. 35-43.



43. Василев, Я.Д. Методика расчета коэффициента трения при холодной прокатке с эмульсией на основе эмпирических зависимостей / Я.Д. Василев // Производство проката. – 2012. – №7. – С. 2-7.
44. Василев, Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М: Металлургия, 1995. – 368 с.
45. Василев, Я.Д. Исследование положения максимума контактных нормальных напряжений относительно нейтрального сечения при холодной прокатке / Я.Д. Василев, М.И. Завгородний, Д.Н. Самокиш // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 21-24.
46. Павлов, И.М. О роли внешних частей полосы в различных случаях прокатки / И.М. Павлов // Изд. АН СССР. Металлы. – 1969. – № 6. – С. 101-106.
47. 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.
48. 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.
49. 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. – 2017. – № 4. – С. 54-59.
50. Шаталов, Р.Л. Распределение размеров и сил прокатки по длине латунных и бронзовых полос на двухвалковом стане / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов // Технология металлов. – 2020. – №8. – С. 32-40.
51. Василев, Я.Д. Исследование точности определения физического коэффициента трения при холодной прокатке методами принудительного торможения полосы и крутящего момента / Я.Д. Василев // Черная металлургия. – 2020. – Том 63. – №8. – С. 639-643.

52. Баранов, Г.Л. Совершенствование расчета контактных напряжений при прокатке полосы / Г.Л. Баранов // Сталь. – 2015. – № 6. – С. 34-39.
53. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением / А. Хензель. – М: Металлургия, 1982. – 360 с.
54. Капланов, В.И. Методики и результаты оценки эффективности технологических смазок при холодной прокатки / В.И. Капланов, И.С. Сухоруков, А.Г. Присяжный // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Том 5. – № 7. – С. 49-53.
55. 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. – ISBN 978-5-9239-0344-7.
56. 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.
57. Шаталов, Р.Л. Определение механических свойств медных и латунных полос по показателям твердости при холодной прокатке / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.Л. Зисельман // Цветные Металлы. – 2014. – №5. – С. 61-65.
58. 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.
59. Зиновьев, А.В. Влияние параметров процесса непрерывного прессования на формирование микроструктуры и механические свойства прутков круглого сечения из сплава М1 / А.В. Зиновьев, А.Н. Кошмин, А.Я. Часников // Металлург. – 2019. – №4. – С. 94-98.
60. Богатов, А.А. Влияние напряжения-деформированного состояния при поперечно-винтовой прокатке на структуру и пластичность металлов и сплавов / А.А. Богатов, Е.И. Панов // Металлург. – 2013. – №5. – С. 75-81.

61. Клюквин, М.Б. Изменение механических свойств толстолистовой стали Х80 в процессе изготовления труб / М.Б. Клюквин, В.Г. Ордин, Ю.И. Матросов, А.Ю. Лоскутов, Ю.А. Зинченко, Н.В. Колясникова, В.И. Левченко, Р.И. Сагиров, Г.Н. Коновалов // *Металлург.* – 2012. – №8. – С. 54-59.

62. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М: *Металлургия*, 1986. – 430с.

63. Galkin, S.P. Effect of preliminary deformation of continuously cast billets by radial-shear rolling on the structure and properties of hot-rolled chromium-containing steel pipes / S.P. Galkin, A.S. Aleschenko, B.A. Romantsev, Y.V. Gamin, R.V. Iskhakov // *Metallurgist.* – 2021. – Vol. 65 (1-2). – P. 185-195.

64. Шаталов, Р.Л. Влияние обжатия и изменения направления прокатки на структуру и свойства латунных листов / Р.Л. Шаталов, А.С. Калмыков, Ю.Ю. Антонов, Н.Н. Литвинова. Тула // *Известия ТулГУ.* – 2017. – Вып.11. – Ч.1. – С. 154-159.

65. Родионова, И.Г. Оптимизация структуры и свойств проката из высокопрочных микролегированных сталей в зависимости от степени холодной деформации / И.Г. Родионова, С.В. Ящук, А.С. Мельниченко, И.Н. Чиркина, Р.Р. Адигамов // *Металлург.* – 2012. – №4. – С. 66-72.

66. Родионова, И.Г. Особенности формирования структуры и свойств холоднокатаных низкоуглеродистых сталей для автомобилестроения в зависимости от степени обжатия при холодной прокатке / И.Г. Родионова, П.А. Мишнев, Р.Р. Адигамов, Ю.С. Быкова, С.В. Жилenko, А.С. Мельниченко // *Металлург.* – 2012. – №2. – С. 62-69.

67. Sergey, A. Aksenov. Processing of plane strain compression test results for investigation of AISI-304 stainless steel constitutive behavior / Sergey A. Aksenov, Jiri Kliber, Yuriy A. Puzino, Stanislav A. Bober // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* – 2015. – 50, 6. – P. 644-650.

68. Morrev, P.G. On construction of SPD stress-strain curve for bronze Cu85-Pb5-Sn5-Zn5 / P.G. Morrev, K.I. Kapyrin, L. Kurdyumova, I.Y. Kulikov, N.V. Tatarchenkov, V.A. Gordon / Materials science and engineering (A). – 2019. – Vol 764. – 137889.

69. Власов, О.В. Закономерности структурно-механических изменений в раскатанной на клин стали 50ХГФА / О.В. Власов, В.В. Галкин, Е.Г. Терещенко, Г.В. Пачурин // Технология Металлов. – 2013. – №6. – С. 17-28.

70. Nestorović. S. Influence of deformation degree at cold-rolling on the anneal hardening effect in sintered copper – based alloys / S. Nestorović // Journal of Mining and Metallurgy. – 2004. – 40B (1). – P.101-109.

71. Li, M. Physical and Mechanical Properties of Copper and Copper Alloys / Li M. and Zinkle S.J // Konings R.J.M., (ed.) Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – volume 4. – pp. 667-690 Amsterdam: Elsevier.

72. Калмыков, А.С. Влияние деформационных условий прокатки латунных листов на структуру и твердость / А.С. Калмыков, Р.Л. Шаталов, А.Л. Генкин. г. Тула // Известия ТулГУ. – 2019. – Вып.5. – С. 152-156.

73. Sonmez, F.O. Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts / F.O. Sonmez, A. Demir // Journal of materials processing technology. – 2007. – Vol. 186. – Nos. 1-3. – Pp. 163-173.

74. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов. Учебник для вузов / В.С. Золоторевский // 3-е изд, перераб. и доп. – М: «МИСИС», 1998. – 400 с.

75. 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. – ISBN 978-5-9239-0344-7.

76. Григорвич, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорвич // Изд-во «Наука», 1976. – 230 с.

77. СТО 22–04–02 Руководство по отбору микропроб, проб и определению механических свойств сталей в металлических конструкциях неразрушающим методом.

78. Федосеев, С.Н. Методы определения твердости / С.Н. Федосеев, А.А. Сапрыкин // Изд. Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, 2012. – 18 с.

79. Василевич, Ю.В. Измерение твердости металлов: лабораторная работа по дисциплине «Неразрушающий контроль качества» для студентов специальности 1 – 54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» / Ю.В. Василевич, Е.Ю. Неумержицкая, А.М. Язневич, Н.Н. Кузменко: – Минск: БНТУ, 2010. – 46 с.

80. Чукин, М.В. Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости / М.В. Чукин, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная // Производство проката. – №12. – 2016. – С 37-42.

81. Pavlina, E. J. Correlation of Yield strength and Tensile strength with hardness for steels / E. J. Pavlina and C. J. Van Tyne // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2008. – vol. 17. – № 6. – pp. 888-893.

82. Tekkaya, A.E. Improved relationship between Vickers hardness and yield stress for cold formed materials / A.E. Tekkaya // Steel Res. – 2001. – 72 (8). – P. 304-310.

83. Gamin, Y.V. Influence of radial-shear rolling conditions on the metal consumption rate and properties of D16 aluminum alloy rods / Y.V. Gamin, S.P. Galkin, B.A. Romantsev, A.V. Goncharuk, M.V. Kadach // Metallurgist. – 2021. – Vol. 65 (5-6). – P. 650-659.

84. Матюнин, В.М. Определение условного предела текучести металла по кинетической диаграмме вдавливания сферического индентора / В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков, П.В. Волков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Том 83. – №6. – С. 57-61.

85. Chenna Krishna, S. On the prediction of strength from hardness for copper alloys / S. Chenna Krishna, Narendra Kumar Gangwar, Abhay K. Jha, and Bhanu Pant // Journal of Materials. – 2013. – Vol. 6 pages.

86. Реморов, В.Е. Связь твердости с напряженно-деформированным состоянием металла / В.Е. Реморов, А.В. Федорович, И.Н. Федорович // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – №4. – С. 67-68.

87. Межгосударственный стандарт ГОСТ 859 – 2014 «Медь. Марки» / М. Стандартиформ, 2015. 6 с.

88. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы Отечественные и зарубежные марки: Справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М: Машиностроение, 2004. – 336 с.

89. ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys, Metal, chapter 1, section 1, ASM International, 2001. – 869 с.

90. <https://metalloy.ru/obrabotka/termo/otzhig-medi>

91. 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 // Изд. ТулГУ. – 2019. – Выпуск 12. – С. 125-127.

92. 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.

93. 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.

94. Vdovin, K.N. Experimental investigations of physical properties of iron-copper alloy / K.N. Vdovin, G.A. Dubskiy, L.G. Egorova, A.A. Nefedyev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 718. –2 020. – 012021.

95. Зайков, М.А. Процесс прокатки / М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов. – М: МИСИС, 2004. – 640 с.

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

97. 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. 70-74.

98. 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. – Pp 70-74.

99. Lo S.-W. The lubricity of oil-in-water emulsion in cold strip rolling under mixed lubrication / Lo S.-W., Yang T.-C., Lin H.-S // Tribology International. – 2013. – № 66. – P. 125-133.

100. Sakai, T. Estimation of lubrication state by observation of rolled strip surface in high-speed cold rolling of mild steel / T. Sakai, J. Saito, K. Kato // Proceedings of the Intern. Conf. Steel Rolling. – Tokio. – 1980. – Vol. 2. – P. 1120-1131.

101. Fujita, N. Influence of plate-out oil film on lubrication characteristics in cold rolling / N. Fujita, Y. Kimura // CAMP ISIJ. – 2009. – 22. – P. 406-409; ISIJ International. – 2012. – Vol. 52. – №5. – P. 850-857.

102. Petrov, P. Abbod M. Analysis of rheological behavior of Al-Cu-Mg-Fe-Ni alloy at elevated temperatures using phenomenological flow stress model / P. Petrov // International Journal of Material Forming, Vol.2, Suppl 1 (2009) 371-374.

103. Шаталов, Р.Л. Определение механических свойств медных полос М0 по показателям твердости по Виккерсу и Бринеллю при холодной прокатке / Р.Л. Шаталов, Чан Ву Куанг, Фам Вьет Хоанг // Metallurg. – 2021. – №11. – С. 51-55.

104. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

105. ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу».

106. Annual Book of ASTM Standards. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope, E140-07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, USA, 2007.

107. Дема, Р.Р. Статистическая оценка влияние смазочного материала на энергосиловые параметры горячей прокатки / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиро., У.Д. Мартынова, Ю.Х. Гатаулина // Сталь. – 2015. – №8. – С. 40-42.

108. Дема, Р.Р. Расчет усилий при горячей прокатке на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с применением системы подачи технологической смазки на основе учета напряженно-деформированного состояния в очаге деформации / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. – №3. – 2013. – С. 14-16.

109. Антонов, П.В. Моделирование напряжений и деформаций валковой системы широкополосного стана холодной прокатки на основе метода конечных элементов / П.В. Антонов, Н.Л. Болобанова, И.А. Кожевникова // Сталь. – 2019. – №5. – С. 28-32.

110. Белосевич, В.К. Оценка технологических смазок для холодной прокатки листов с помощью комплексного критерия эффективности / В.К. Белосевич, С.М. Ионов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 9. – С. 36-38.

111. Samusev, S.V. Development of effective roll pass designs for production of longitudinally welded pipes of small and medium diameters / S.V. Samusev, V.A. Fadeev & T.Y. Sidorova // Metallurgist. – 2020. – Vol. 64. – P. 658-664.

112. Божков, А.И. Методика расчета режимов холодной прокатки полос на многоклетьевом стане, обеспечивающих снижение себестоимости продукции листопрокатного цеха. Сообщение 1 / А.И. Божков, Д.А. Ковалев, В.С. Потапов, Р.И. Шульгин. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2019. – № 7. – Т.62. – С. 511-516.

113. Божков, А.И. Методика расчета режимов холодной прокатки полос на многоклетевом стане, обеспечивающих снижение себестоимости продукции листопрокатного цеха. Сообщение 2 / А.И. Божков., Д.А. Ковалев, В.С. Потапов, Р.И. Шульгин // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2019. – № 9. – Т.62. – С. 667-673.

114. Зильберг, Ю.В. Закон и модели пластического трения / Ю.В. Зильберг // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 22-24.



115. Леванов, А.Н. Состояние и перспективы исследований контактного трения в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов // Сталь. – 2000. – № 9. – С. 31-35.
116. Василев, Я.Д. Модель напряжений трения при тонколистовой прокатке / Я.Д. Василев, А.В. Дементиенко // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 19-23.
117. Keropyan A. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area / A. Keropyan, S. Gorbatyuk // Procedia engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 406-410.
118. 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.
119. Баранов, Г.Л. Совершенствование расчета контактных напряжений при прокатке полосы / Г.Л. Баранов // Сталь. – 2015. – № 6. – С. 34-39.
120. Гарбер, Э.А. Уточнение расчета мощности главного привода для процесса холодной прокатки на широкополосных станах / Э.А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов // Череповец: Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 4. – Т. 1. – С. 5-9.
121. 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.
122. Шаталов, Р.Л. Распределение размеров и сил прокатки по длине латунных и бронзовых полос на двухвалковом стане / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов // Технология металлов. – 2020. – № 8. – С. 32-40.
123. Шаталов, Р.Л. Влияние смазок на деформационные, силовые показатели и размеры медных и латунных листов при прокатке / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.К. Чан // Изв. ТулГУ. – 2019. – Вып. 12. – С. 125-127.
124. Шаталов, Р.Л. Исследование влияния смазочных материалов валков на деформационные и силовые показатели и размеры полос при холодной прокатке

меди / Р.Л. Шаталов, В.К. Чан, В.Х. Фам // Технология металлов. – 2021. – № 12. – С. 40-46.

125. Шаталов, Р.Л. Влияние условий контактного трения на деформационные и силовые показатели при прокатке тонких полос из меди и латуни / Р.Л. Шаталов, Е.В. Крутина, А.С. Лукаш, О.А. Белкина, С.А. Бражников // Производство проката. – 2015. – №5. – С. 3-6.

126. Чан, В.К. Уточнение математической модели и алгоритма расчета контактного давления и силы прокатки тонких полос на основе экспериментальных исследований / В.К. Чан, В.Х. Фам, Т.Б. Гаппаров // Сборник материалов. Третья международная научно-техническая конференция «ПАВЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». – 2021. – С. 65-66.

127. Чан, В.К. Влияние смазочных материалов на силу прокатки по длине тонких медных полос / В.К. Чан, В.Х. Фам // Сборник конференции – Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2021». Московский политехнический университет. – 2021. С. 208-211.

128. QForm. Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. URL: <http://qform3d.ru/> (дата обращения: 25. 05. 2018).

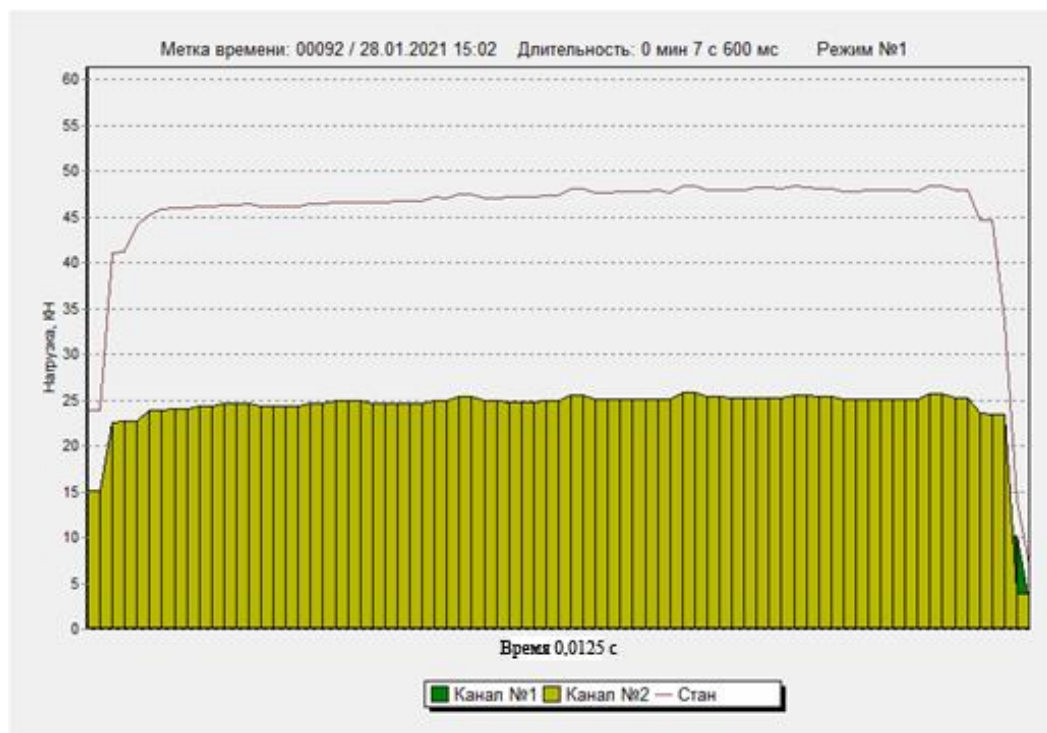
129. Богатов, А.А. МКЭ-моделирование и оптимизация нового способа обжатия непрерывнолитой заготовки / А.А. Богатов и др // Черные металлы. – 2013. – №11 (983). – С. 26-31.

130. Ефремов, Д.Б. Определение изменения параметров внешнего профиля труб большого диаметра при экспандировании с помощью подпрограммы в среде QForm / Д.Б. Ефремов, Нгуен Зуй Кыонг // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020. – №4. – С. 33-38.

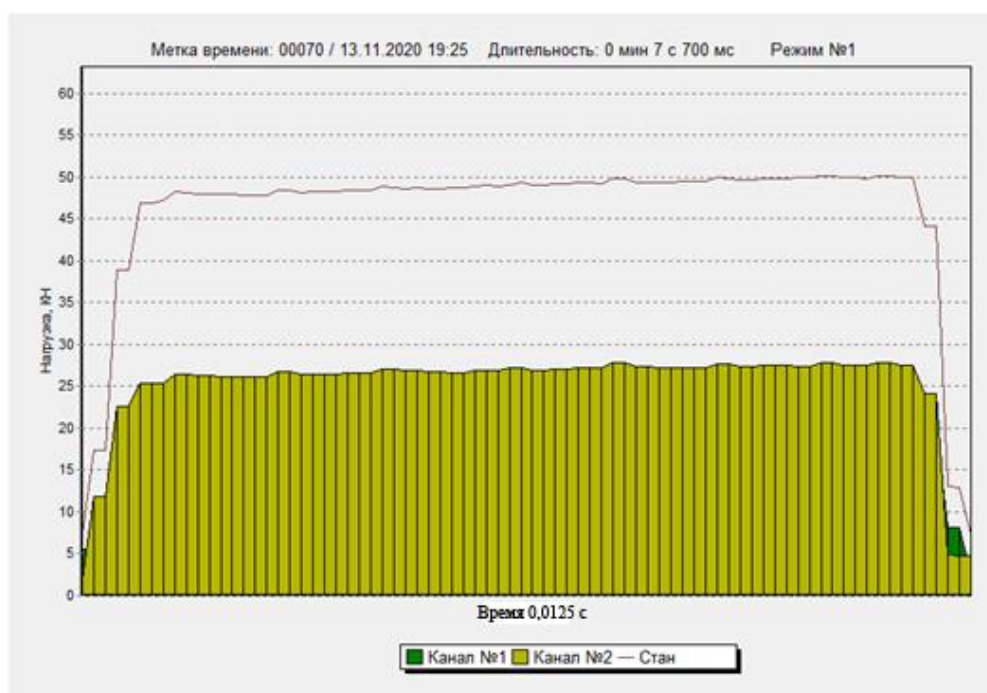
131. Чан, В.К. Исследование эффективности применения смазок валков при холодной прокатке медных лент на промышленном двухвалковом стане 175x300 / В.К. Чан, Р.Л. Шаталов, В.Х. Фам, С.Х. Хуинь // Metallurg. – 2022. – №6. – С. 48-54.

## Приложение 1

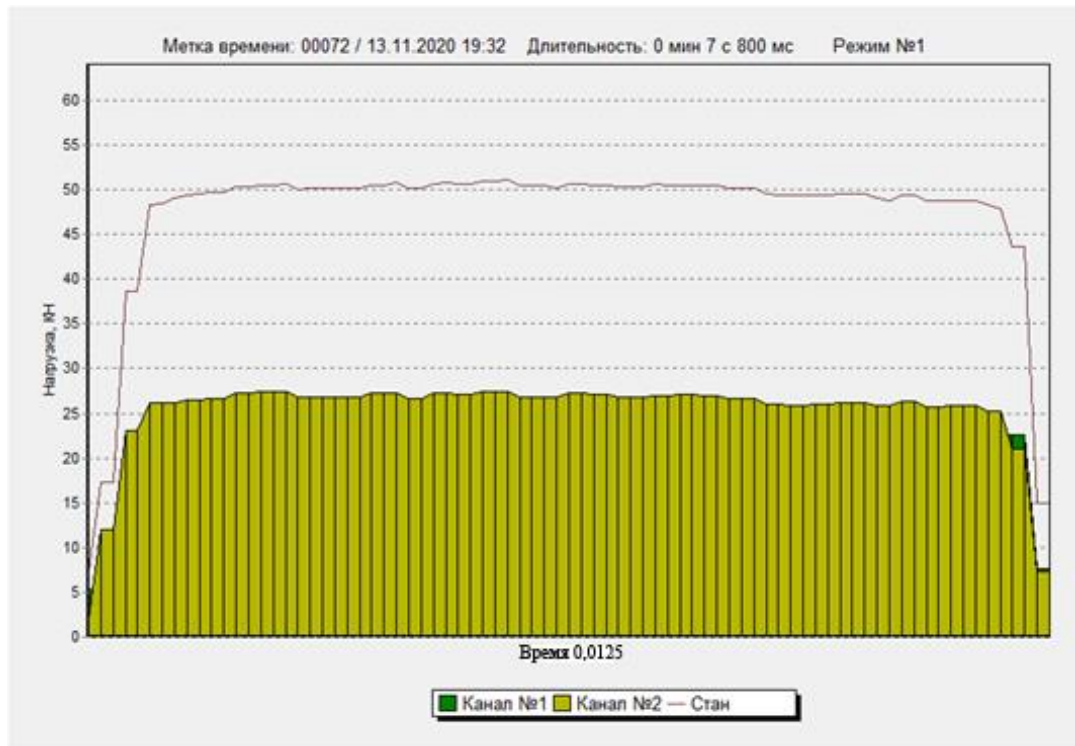
**Распределение силы прокатки при холодной деформации с обжатием 20% медных М0 полос исходным размером 3х25х200мм с различными технологическими смазками на стане 150х235**



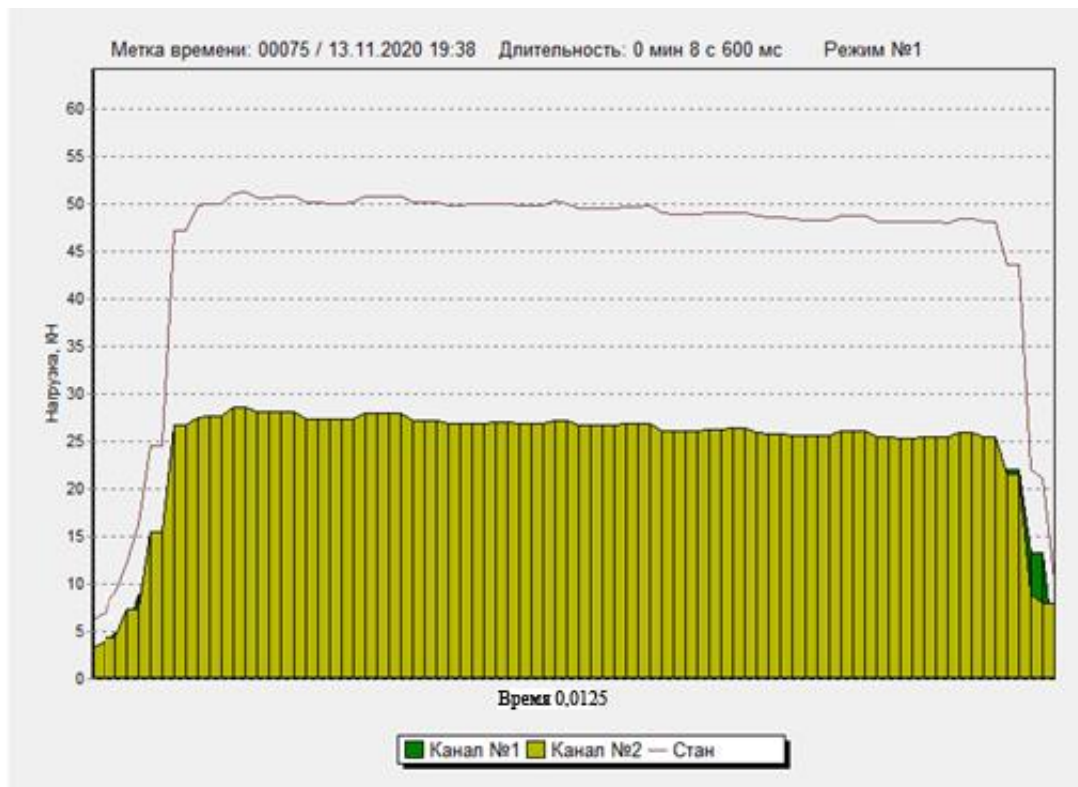
Сила прокатки при смазке пальмовым маслом



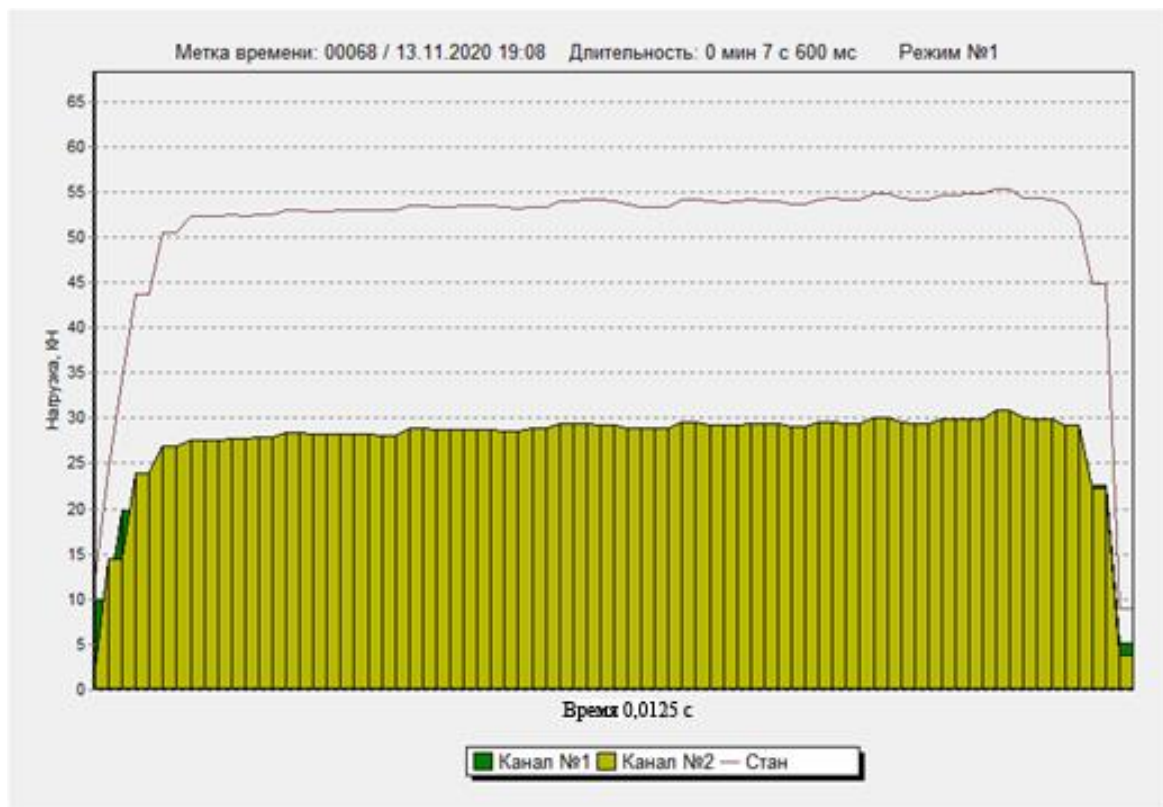
Сила прокатки при смазке СПЗ



Сила прокатки при смазке И40



Сила прокатки при смазке подсолнечным маслом



## Приложение А

### Акт об использовании результатов исследования на стане 175х300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам)

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

ООО «Машиностроительный завод»

г. т.н., Нгуен Куанг Винь

2022 г.



АКТ

об использовании результатов кандидаткой диссертации Чан Ву Куанга на тему  
«Экспериментальное исследование механических свойств и влияния  
технологических смазок при холодной прокатке медных лент на их толщину и  
энергосиловые параметры процесса» на машиностроительном заводе в городе  
Донг Най, Вьетнам

На основании результатов расчетов проведены опытные прокатки лент  
толщиной 0,55мм из меди М0 с применением технологических смазок И20 и  
И40 на двухвалковом стане 175х300 машиностроительного завода. Комиссия по  
науке и технологиям завода подтверждает, что результаты исследований  
диссертации Чан Ву Куанга использованы:

1. при совершенствовании технологических процессов холодной прокатки  
медных лент, а также проектирования и определения силовых показателей  
процесса по длине раската на стане 175х300 завода;
2. при разработке рациональных режимов с уменьшением с 3 до 2 числа  
проходов прокатки точных по длине лент толщиной 0,55мм из меди М0 с  
технологическими смазками И20 и И40 на двухвалковом стане 175х300.

Начальник цеха *[Signature]*

Хуинь Суан Хоанг

Старший инженер *[Signature]*

Тхан Тхэ Тхьеу



## Приложение Б

**Акт об использовании результатов исследования в учебном процессе  
университета «Чан Дай Нгхиа», город Хо Ши Минь, Вьетнам**

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Ректор университета «Чан Дай Нгхиа»

к.т.н., Чан Хонг Тхань

2022 г.



**Tiến sĩ AKT Trần Hồng Thanh**

«Экспериментальное исследование механических свойств и влияния технологических смазок при холодной прокатке медных лент на их толщину и энергосиловые параметры 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 декана факультета «Машиностроение» составила настоящий акт, которым подтверждается что результаты диссертации Чан Ву Куанга 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,  
к.т.н., доцент

ЛЫОНГ ХОНГ СЭМ

Начальник отдела обучения,  
К.Т.Н.,

Дао Нгок Диен

Декана факультета «Машиностроение»,  
к.т.н., доцент

Чан Тхэ Ван

## Приложение В

### Акт об использовании результатов исследования в учебном процессе кафедры «ОМД и АТ» Московского Политехнического Университета

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

АКТ

№ 08-01/22  
*Московский Политех*  
(место составления)



А.Ю. Наливайко

**О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Экспериментальное исследование механических свойств и влияния технологических смазок при холодной прокатке медных лент на их толщину и энергосиловые параметры процесса», выполненной соискателем кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Чан Ву Куангом.**

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

по теме «Экспериментальное исследование механических свойств и влияния технологических смазок при холодной прокатке медных лент на их толщину и энергосиловые параметры 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 «Влияние смазывания валков на формирование деформационных, силовых показателей прокатки и размеров по длине тонких полос».  
(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 №1 от 26.08.2022.

Начало использования объекта внедрения: 01 сентября 2022 года.

Начальник учебно-методического управления

*(подпись)*  
(личная подпись)

А.Б. Максимов

Декан факультета,  
внедривший разработку

*(подпись)*  
(личная подпись)

Е.В. Сафонов