

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Шаталов Роман Львович

Москва – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 использованием 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), промышленное масло 5% (И40), подсолнечное масло 5%. Прокатку полос проводили на двухвалковом прокатном стане 150х235, оснащённом 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 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 «ОМД и АТ» 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 «ОМД и АТ» 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, 25/5/2022).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования, сформулирована научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, достоверность, апробация работы, публикации, структура и объем диссертации.

В первой главе приведен аналитический обзор исследований известных ученых о факторах, которые влияют на среднее контактное нормальное напряжение при холодной прокатке. Показано, что нормальное напряжение (давление) в очаге деформации зависит от двух групп: первая – факторы, определяющие механические свойства металла при пластической деформации, в том числе сопротивление деформации σ_r ; вторая – факторы, влияющие на характер напряженного состояния: контактное трение, внешние зоны, натяжение полосы и другие переменные.

Приведены методы расчета давления и сил при холодной прокатке полос крупных учёных: А.И. Целикова, А.А. Королева, Е.С. Рокотяна, М.Д. Стоуна, А.В. Третьякова, В.М. Луговскова и других учёных. Анализ показал, что при расчете по этим методам отклонения расчетных значений сил прокатки от экспериментальных данных, иногда, находятся в диапазоне от -30 до +30%.

Анализ результатов исследования российских и зарубежных учёных о зависимости механических свойств (предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения и твердости) от степени пластической деформации при холодной прокатке тонких полос и взаимность между различными механическими показателями сплавов меди требует дополнительного изучения. Эмпирические уравнения для расчета механических свойств меди М0 от относительного обжатия, а также для расчета сопротивления деформации по твердостям после холодной прокатки не приведены, что затрудняет проведение расчетов силовых показателей.

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 применения различных технологических смазок влияет на силу прокатки и формирование толщины по длине полос и лент, что практически не исследовано. Существует потребность в выявлении технологической смазки,

обеспечивающей рациональное изменение силовых и деформационных показателей прокатки, а также толщины по длине полосы с учетом марки и химического состава сплава.

Во второй главе приведены результаты исследования механических свойств медных полос известного химического состава при холодной прокатке. Установлен конкретный химический состав полос и лент из меди М0, которые прокатываются на промышленном стане 170х300 на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме. В результате был уточнен химический состав меди М0: 99,95% Cu, 0,035% O, 0,003% Pb, 0,001% S, 0,001% Ni, 0,004% Sb, 0,0005% Si, 0,0004% Cr, 0,0002% P, 0,0003% Mn, 0,0024% Fe, 0,0022% (Sn, Zn, Al и другие). Химический состав медных полос соответствует межгосударственному и российскому стандарту ГОСТ 859 – 2014.

Проводили процессы холодной прокатки 9 тонких полос из меди М0 по три образца с обжатием $\varepsilon_1 \approx 10$, $\varepsilon_2 \approx 20$ и $\varepsilon_3 \approx 30\%$ в сухих валках на двухвалковом стане 150х235 в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского политехнического университета.

Испытания для определения механических свойств образцов до и после прокатки выполнялись на машине Zwick/Roell Z250 в лаборатории Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Форма и размеры заготовок вырезались по ГОСТу 1497 – 84.

Результаты испытания на растяжение представлены в таблице 1 и показаны кривыми на рисунке 1.

Таблица 1. Основные показатели механических свойств отожженных и прокатанных полос из меди М0

№ обр.	h_0 мм	h_1 мм	ε %	σ_T МПа	σ_B МПа	δ %	$\lg \delta$
1	3,05	—	0	41	221	62,8	1,798
2	3,05	—	0	45	222	61,9	1,792
3	3,07	—	0	47	222	61,7	1,790
4	3,05	2,74	10,16	173	239	47,1	1,673
5	3,07	2,75	10,42	177	240	46,4	1,667
6	3,06	2,72	11,11	186	242	44,9	1,652
7	3,04	2,43	20,07	272	281	27,9	1,446
8	3,04	2,42	20,39	273	283	27,1	1,433
9	3,05	2,36	22,62	277	284	26,9	1,430
10	3,06	2,20	28,10	301	308	17,3	1,238
11	3,08	2,15	30,19	307	312	16,8	1,225
12	3,06	2,13	30,39	308	315	16,1	1,207

В таблице 1 обозначено: h_0 и h_1 – толщина полосы до и после прокатки, σ_T , σ_B – экспериментальные величины предела текучести и временного сопротивления, МПа; δ – относительное удлинение образцов при растяжении, %.

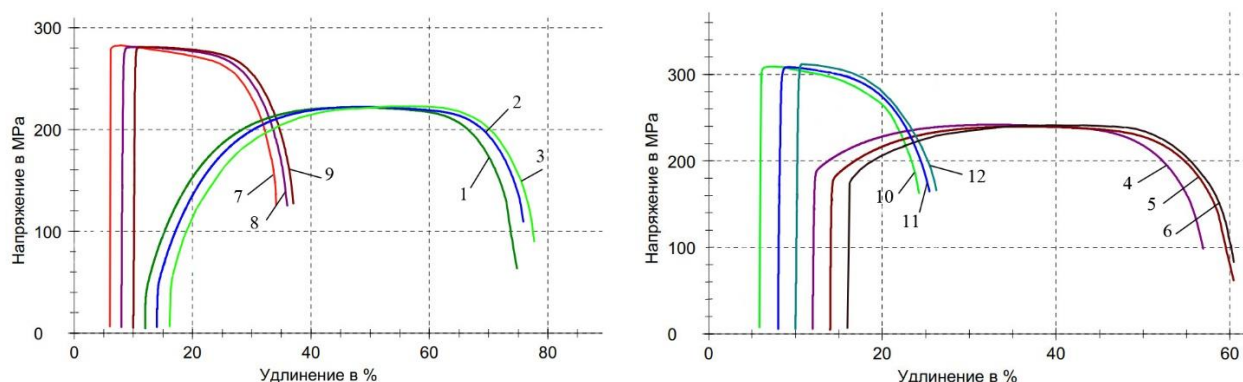


Рисунок 1. Кривые упрочнения образцов меди М0: 1, 2, 3 – отожженные образцы; 4, 5, 6 – относительное обжатие полос $\varepsilon \approx 10\%$; 7, 8, 9 – $\varepsilon \approx 20\%$; 10, 11, 12 – $\varepsilon \approx 30\%$.

Установлены закономерности изменения прочностных и пластических характеристик меди М0 от степени холодной деформации полос. Показано на рисунке 2, что временное сопротивление σ_v и предел текучести σ_T с увеличением обжатия возрастают с различной интенсивностью. σ_v увеличивается монотонно практически по линейному закону от 221 до 315 МПа; σ_T – интенсивно возрастает от 41 до 308 МПа по параболическому закону при обжатии от 0 до 30%. Показатель пластичности – δ уменьшается от 63 до 16% по линейному закону.

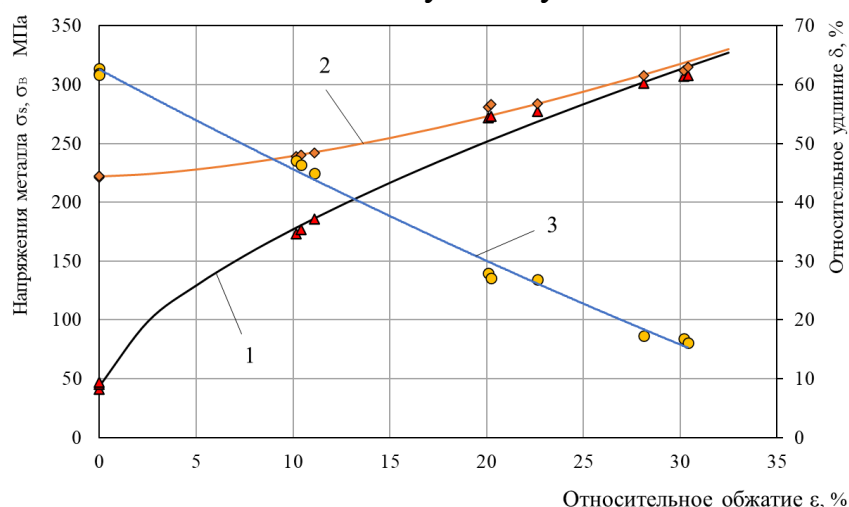


Рисунок 2. Зависимости механических свойств меди М0 от степени деформации: 1 – предел текучести; 2 – временное сопротивление; 3 – относительное удлинение.

Измерили твердость по Виккерсу (HV) образцов из отожженных и прокатанных полос меди М0 в лаборатории НИТУ «МИСиС». По ГОСТу 2999-75 в качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамиду, которая вдавливалась в образец под нагрузкой $P=1\text{кгс}$ с выдержкой 10с.

Определена корреляция между твердостями металлов для расчета значений твердости HB по HV. Корреляция имеет вид:

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

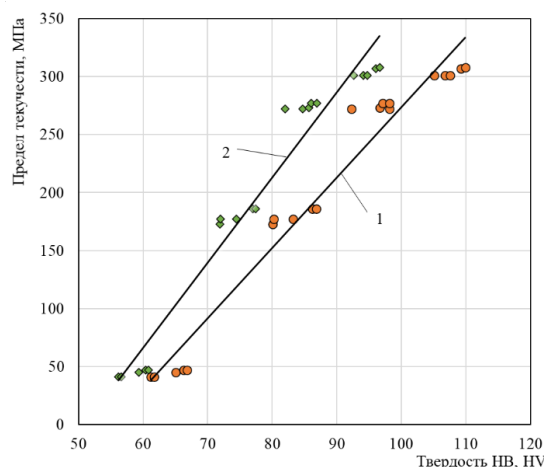
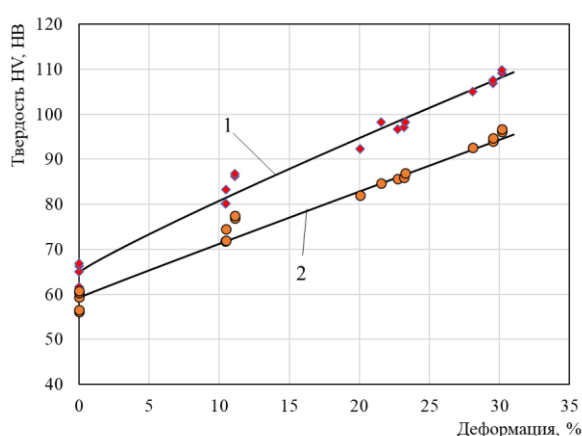
Результаты измерения твердости отожженных образцов и полос из меди М0 после холодной прокатки с различными обжатиями (10, 20 и 30%), приведенные в таблице 2 позволяют построить зависимости твердости HV и

НВ от степени деформации. Показано, что с увеличением обжатия от 0 до 30% твердость НВ и НВ возрастает по линейному закону от 61 до 110 НВ и от 56-97 НВ соответственно.

Таблица 2. Твердость по Виккерсу (НВ) и Бринеллю (НВ) медных М0 полос при различных обжатиях

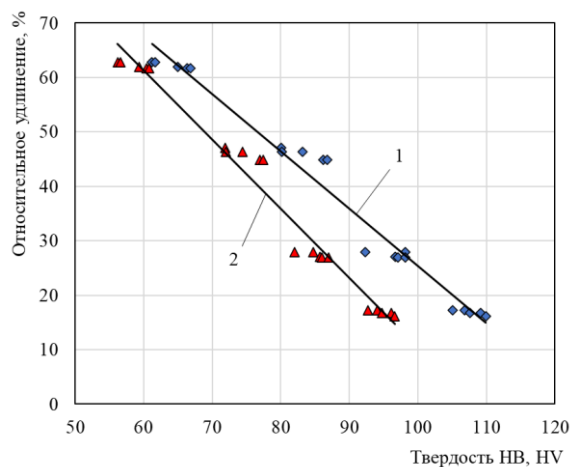
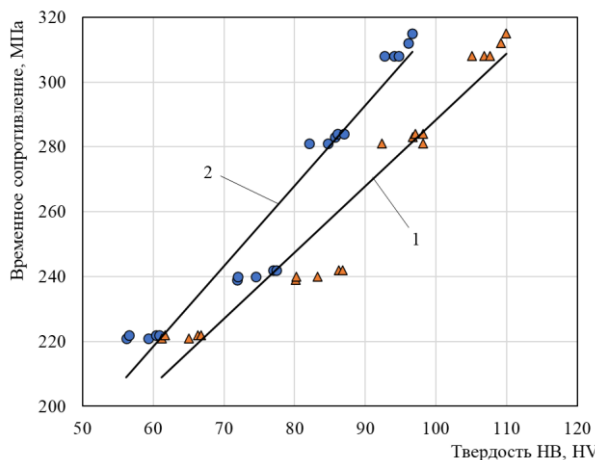
Место измерения	Не наклепанная полоса ($\varepsilon = 0\%$)		Образца №1 ($\varepsilon_1 \approx 10\%$)		Образца №2 ($\varepsilon_2 \approx 20\%$)		Образца №3 ($\varepsilon_3 \approx 30\%$)	
	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
1	66,3	60,4	86,8	77,5	92,3	82,0	107,6	94,7
2	65,0	59,3	80,1	71,9	98,2	86,9	106,8	94,1
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

Построены графики и получены зависимости основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от показателей твердостей прокатанных полос из меди М0.



а) Зависимость твердости от деформации:
1 – твердость НВ; 2 – твердость НВ.

б) Зависимость σ_T от твердости НВ (1) и НВ (2)



в) Зависимость σ_B от твердости НВ (1) и НВ (2) г) Зависимость δ от твердости НВ (1) и НВ (2)

Рисунок 3. Зависимости основных показателей механических свойств меди М0 от твердости НВ (1) и НВ (2).

Получены регрессионные уравнения, которые позволяют определять механические свойства медных М0 полос от степени деформации и твердостям (НВ и НV) с высокими коэффициентами корреляции ($R^2 > 0,93$).

Таблица 3. Регрессионное уравнение для расчета механических свойств медного сплава от степени деформации и показателям твердости

Величина	Регрессионное уравнение	Коэффициент R^2
Твердость	$HV = 65 + 1,95\varepsilon^{0,91}$	0,96
	$HB = 59,33 + 1,25\varepsilon^{0,98}$	0,95
Предел текучести	$\sigma_T = 44 + 30,55\varepsilon^{0,64}$	0,95
	$\sigma_T = 7,33 \cdot HB - 373,4$	0,94
	$\sigma_T = 6,05 \cdot HV - 331,66$	0,95
Временное сопротивление	$\sigma_B = 222 + 0,49\varepsilon^{1,55}$	0,96
	$\sigma_B = 2,48 \cdot HV + 69,55$	0,93
	$\sigma_B = 2,05 \cdot HB + 83,31$	0,93
Относительное удлинение	$\lg \delta = -0,0003\varepsilon^2 + 0,0098\varepsilon + 1,7961$	0,98
	$\delta = 0,0068\varepsilon^2 - 1,764\varepsilon + 62,582$	0,98
	$\delta = -1,04 \cdot HV + 129,84$	0,97
	$\delta = -1,26 \cdot HB + 137,43$	0,97

В третьей главе приведены результаты исследования деформационных, силовых и энергосиловых показателей по длине медных полос при холодной прокатки в сухих валках и с технологическими смазками, а также представлена усовершенствованная модель расчета среднего давления металла на валки.

После настройки стана 150x235 на зазор между валками $S_0 = 2,10$ мм прокатали 15 полос с размерами 3x25x200 мм из меди М0. При этом, по 3 полосы прокатали в сухих валках, по 3 полосы прокатали со смазкой пальмовым маслом, по 3 полосы – со смазкой эмульсией 6% (СПЗ), по 3 полосы – со смазкой индустриальным маслом И40 (5%) и по 3 полосы – со смазкой подсолнечным маслом (5%).

Коэффициенты контактного трения $f_{тр}$ при холодной прокатке с различными технологическими смазками определяли по уравнению А.П. Грудева:

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

где: R_z – высота неровностей на поверхности валка, $R_z = 1,6$ мкм; v_{50} – кинематическая вязкость смазки при 50°C, при смазке индустриальным маслом И40 $v_{50} = 30$ м²/с, подсолнечным маслом $v_{50} = 31$ м²/с; v – скорость

прокатки, $v = 0,25 \text{ м/с}$; $K_{\text{см}}$ – коэффициент, учитывающий природу смазки. Для растительных масел $K_{\text{см}} = 1,0$; для минеральных $K_{\text{см}} = 1,4$.

Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения: со смазкой пальмовым маслом – $f_{\text{тр}} = 0,066$; с СПЗ – $f_{\text{тр}} = 0,074$; с И40 (5%) – $f_{\text{тр}} = 0,076$ и с подсолнечным маслом (5%) – $f_{\text{тр}} = 0,079$. При холодной прокатке меди в сухих валках коэффициент трения составляет $f_{\text{тр}} = 0,09$.

Таблица 4. Деформационные, силовые показатели и размеры по длине медных (М0) полос при холодной прокатке с технологическими смазками на двухвалковом стане 150х235

Смазка	Место	h_0 , мм	b_0 , мм	l_0 , мм	h_1 , мм	b_1 , мм	l_1 , мм	ε , %	$P_{\text{расч}}$, кН	$P_{\text{э}}$, кН	ΔP , кН
Пальмовое масло	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	2,40	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%)	1 (н)	3,06	24,94	0	2,40	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%)	1 (н)	3,05	24,92	0	2,40	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%)	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	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

В таблице обозначено: h_0 , h_1 – толщины полос до и после прокатки, мм; b_0 , b_1 – ширина полос до и после прокатки, мм; l_0 , l_1 – длина полос до и после прокатки, мм; ε – относительное обжатие металла, %; $P_{\text{э}}$ – измеренное значение силы прокатки по длине полосы, кН; $P_{\text{расч}}$ – расчетное значение силы прокатки, кН; ΔP – погрешность между экспериментальной и рассчитанной силой прокатки, кН.

Влияние технологических смазок на силовые и деформационные показатели прокатки. Представлены графики влияния различных условий контактного трения на силу прокатки при деформации опытных полос (рисунок 4). Применение технологических смазок позволяет уменьшить силу прокатки. При технологической 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%) по сравнению с прокаткой в сухих валках.

Условия контактного трения влияют на деформационные показатели прокатки. Улучшенные условия контактного трения позволяют увеличить обжатие металла и уменьшить толщину полос на выходе из стана без изменения зазора между валками. При прокатке полос из меди М0 в сухих валках среднее относительное обжатие в основной части $\varepsilon = 18,63\%$, средняя толщина $h_1 = 2,49$ мм в средней точке, при смазке подсолнечным маслом (5%), $\varepsilon = 19,61\%$, $h_1 = 2,46$ мм, при смазке индустриальным маслом И40 (5%), $\varepsilon = 19,93\%$, $h_1 = 2,45$ мм, при смазке СПЗ (6%), $\varepsilon = 20,26\%$, $h_1 = 2,44$ мм, а при смазке пальмовым маслом относительное обжатие увеличилось до $\varepsilon = 21,31\%$, а толщина уменьшилась до $h_1 = 2,40$ мм. Следовательно, применение технологической смазки - пальмового масла при прокатке медных (М0) полос увеличивает величину относительного обжатия на 2,68% и уменьшает толщину полос на выходе из стана примерно до 0,09 мм, что необходимо учитывать при настройке стана на прокатку полос, листов и лент заданной толщины.

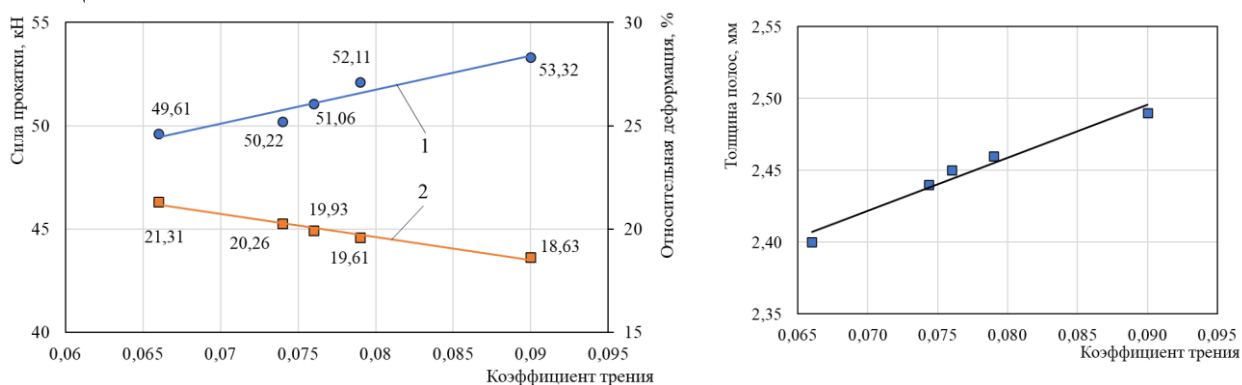


Рисунок 4. Влияние коэффициента контактного трения соответствующих различным технологическим смазкам на максимальную силу прокатки (1); относительное обжатие (2) и толщину металла на стане 150x235 при холодной прокатке полос из меди М0

Влияние технологических смазок на деформационные и силовые показатели прокатки по длине тонких полос. Из данных, которые приведены в таблице 4 и на рисунке 5, следует, что применение различных технологических смазок при холодной прокатке медных (М0) полос существенно влияет на изменения деформационных и силовых показателей по длине полос. Впервые установлено, что при прокатке с технологическими смазками разница между деформационными в 1,5-2 раза и силовыми в 1,2-1,3 раза показателями на концевых участках и в средней части меньше, чем при прокатке полос в сухих валках. Разница степени деформации концевых участков и средней части полос уменьшается с 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 с 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 с технологическими смазками.

Применение четырех смазочных материалов показало, что при прокатке с технологическими смазками разница между деформационными, силовыми показателями на концевых участках и в средней части ниже, чем при прокатке полос в сухих валках.

Выявлены основные механизмы выравнивания деформационных и силовых показателей прокатки по длине полос при применении технологических смазок. 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%.

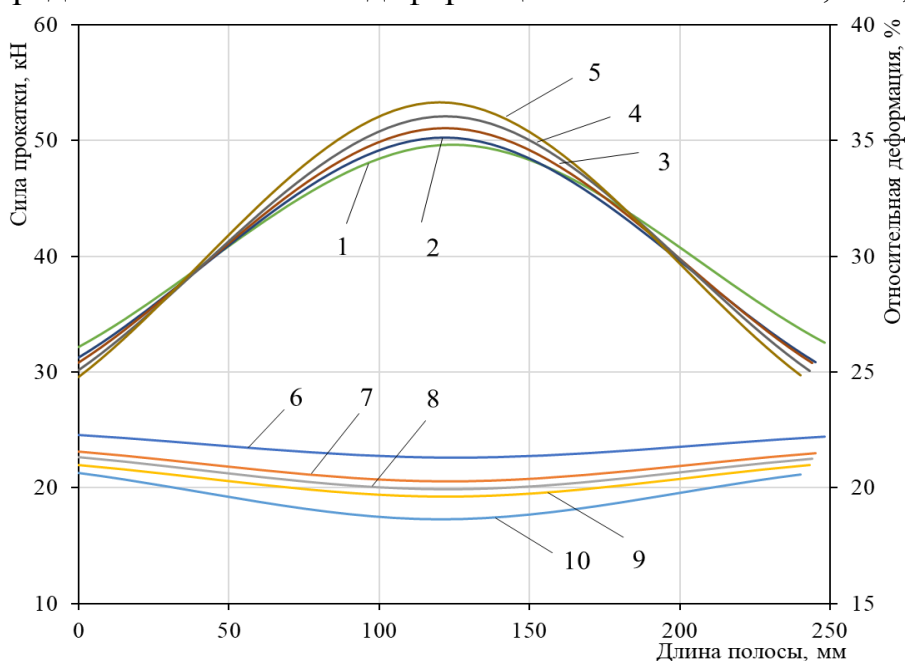


Рисунок 5. Влияние технологических смазок на силовые (кривые 1-5) и деформационные (кривые 6-10) показатели по длине полос: 1, 6 – пальмовое масло; 2, 7 – СПЗ (6%); 3, 8 – И40 (5%); 4, 9 – подсолнечное масло 5%; 5, 10 – сухие валки.

Результаты исследования позволили установить количественные закономерности влияния различных технологических смазок на деформационные и силовые показатели холодной прокатки и размеры по длине тонких полос из меди М0 известного химического состава из промышленных партий, а также оценить точность расчета этих параметров на разработанной компьютеризированной имитационной модели.

Уточнение и усовершенствование модели и алгоритма расчета среднего давления при прокатке концевых участков и основной части полос. Сила прокатки $P_{расч}$ на участках деформируемой без натяжения

полосы зависит от величины среднего контактного давления p_{cp} металла на валки и площади контакта F по известному уравнению:

$$P_{расч} = p_{cp} F, \quad (2)$$

где: $F = \sqrt{\Delta h R} b_{cp} = l_d b_{cp}$; l_d – длина дуги захвата, мм; R – радиус рабочих валов, мм; $b_{cp} = (b_0 + b_1) / 2$ – средняя ширина полосы в очаге деформации, мм; Δh – абсолютное обжатие полосы при прокатке, мм.

Среднее контактное давление в установившемся периоде прокатки зависит от среднего предела текучести металла $\sigma_{тср}$, коэффициента напряженного состояния n_{cp} , коэффициента влияния вне контактных зон на очаг деформации n_{σ} , и коэффициента влияния натяжения n_H , который при прокатке полос без натяжения равен единице. Поэтому среднее контактное давление металла на валки с учетом перечисленных факторов определяют по уравнению:

$$p_{cp} = 1,15 \sigma_{тср} n_{cp} n_{\sigma} n_H, \quad (3)$$

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

Результаты теоретических исследований и решений Р.Л. Шаталова и М.А. Куликова, а также проведенных экспериментов при прокатке меди показывают, что на давление металла на валки и, соответственно, силу прокатки влияют также внешние части полосы. Причем, с увеличением жесткости и толщины прокатываемой полосы значение коэффициента влияния внешних частей полосы n_b на очаг деформации возрастает, что необходимо учитывать при определении среднего давления. Поэтому для уточнения метода определения среднего давления металла на валки рекомендуется учитывать коэффициент n_b влияния внешних частей полосы на очаг деформации, и давление при прокатке с натяжением определять по уравнению:

$$p_{cp} = 1,15 \sigma_{тср} n_{cp} (n_{\sigma} n_b)^{0,5} n_H, \quad (4)$$

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

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

На структуру уравнения для определения коэффициента n_b влияния внешних частей полос существенное влияние оказывает интенсивность упрочнения, которая характеризуется величиной коэффициента упрочнения металла D (в уравнении $\sigma_T = A + B \varepsilon^D$) при обжатии. Анализ результатов опытных прокаток тонких полос из меди и алюминия позволил определить вариативность применения величины показателя упрочнения металлов и сплавов D при расчете n_b .

Если $D \geq 0,4$, то n_b определяется по формуле:

$$n_b = (\sigma_{т0} / \sigma_{тср}) (h_1 / h_{cp}), \quad (6)$$

Если $D < 0,4$, то рекомендуется использовать для расчета n_b уравнение:

$$n_b = (\sigma_{т1} / \sigma_{тср}) (h_1 / h_{ср}), \quad (7)$$

При прокатке тонких полос и лент, когда $l_d / h_{ср} > 1$ формула для определения n_σ имеет вид:

$$n_\sigma = (l_d / h_{ср})^{0,5}, \quad (8)$$

Средний коэффициент напряженного состояния $n_{ср}$ зависит от контактных сил трения, формы и размеров очага деформации и вычисляется по уравнению А.И. Целикова:

$$n_{ср} = \frac{2(1-\varepsilon)h_\gamma}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left(\left(\frac{h_\gamma}{h_1} \right)^\delta - 1 \right), \quad (9)$$

где: $\delta = 2fl_d / \Delta h$; $h_\gamma = \sqrt{h_0 h_1}$ – 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:

$$p_{ср} = 1,15\sigma_{тср}, \quad (10)$$

Блок-схема алгоритма расчета давления и силы прокатки показана на рисунке 6.

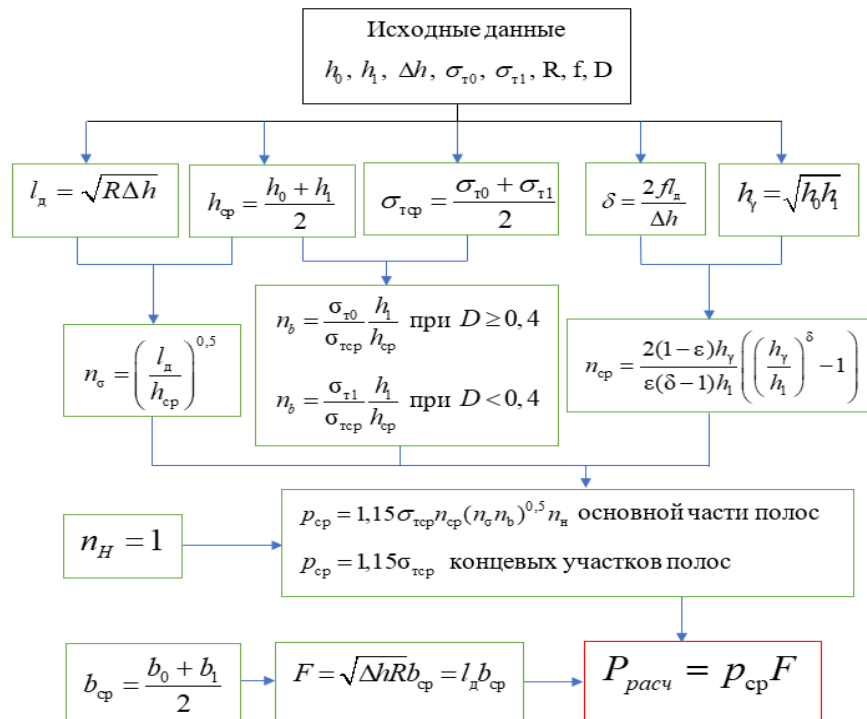


Рисунок 6. Блок-схема алгоритма расчета давления и силы при холодной прокатке тонких полос и лент

Установлена применимость разработанных математических моделей для расчета давления и силы прокатки по длине полос и лент на

стационарных и неустановившихся участках деформирования. Усовершенствованная модель и метод расчета давления и силы прокатки позволяет повысить точность расчета. При этом погрешность не превышает $-7 \div 3\%$ по сравнению с экспериментальными результатами.

Решение задачи снижения энергосиловых параметров прокатки с применением технологических смазок.

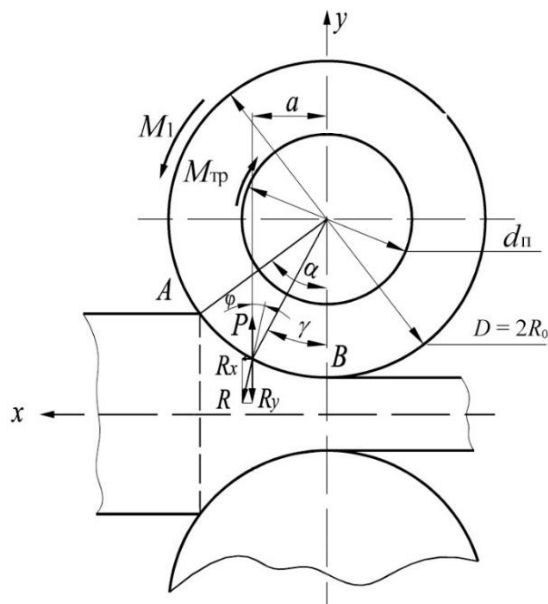


Рисунок 7. Расчетная схема сил и моментов, действующих при холодной прокатке на двухвалковом стане: M_1 – момент со стороны главного привода, кНм; $M_{тр}$ – момент трения в подшипниках вала, кН м;

Исследовали влияние технологических смазок на потребляемую мощность при прокатке медных полос.

Мощность прокатки на валу двигателя определяется по моменту прокатки и моменту трения для данной скорости вращения валков. При определении мощности прокатки N использовали известную формулу:

$$N = M_{дв} \omega = M_{дв} V / R_0, \quad (11)$$

где N – мощность прокатки, кВт; ω – угловая скорость валков, c^{-1} ; V – скорость прокатки, $v = 0,25 \text{ м/с}$; R_0 – радиус валков, $R_0 = 70,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Таблица 5. Результаты расчета крутящего момента и мощности прокатки при холодной деформации медных полос на лабораторном двухвалковом стане 150x235

Смазка	h_0 мм	ε %	h_γ мм	P кН	$M_{тр}$ кН м	$M_{пр}$ кН м	$M_{дв}$ кНм	N кВт
Пальмовое масло	3,05	21,31	2,71	49,61	0,016	0,481	0,603	2,131
СПЗ	3,06	20,26	2,73	50,27	0,016	0,484	0,607	2,143
И40	3,06	19,93	2,74	51,06	0,016	0,489	0,614	2,168
Под. масло	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

В таблице: P – максимальная сила прокатки, кН; $M_{тр}$ – момент трения в подшипниках валков, кНм; $M_{пр}$ – момент прокатки, кНм; $M_{дв}$ – крутящий момент, кНм; N – мощность прокатки, кВт.

Из анализа результатов исследования можно делать вывод, что при применении технологических смазок мощность прокатки уменьшается от 2,193 кВт при прокатке в сухих валках до 2,131 кВт при технологической смазке пальмовым маслом. По сравнению с прокаткой в сухих валках, разница мощности прокатки при применении технологических смазок составляет до 0,062 кВт (2,8%). Наиболее эффективной является пальмовое масло.

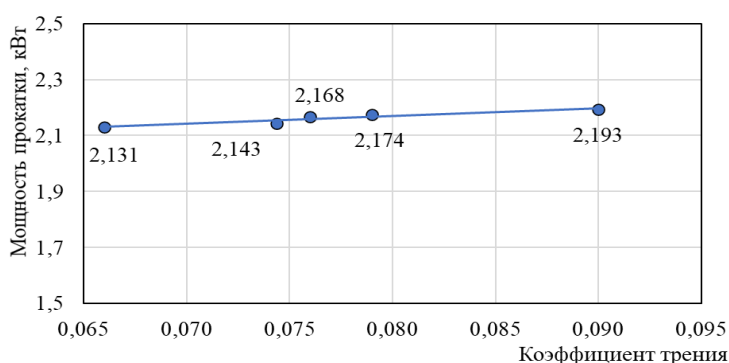
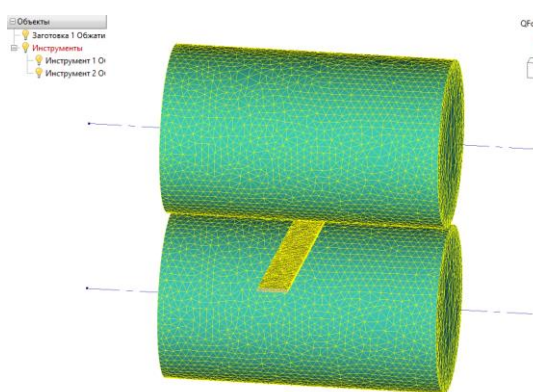
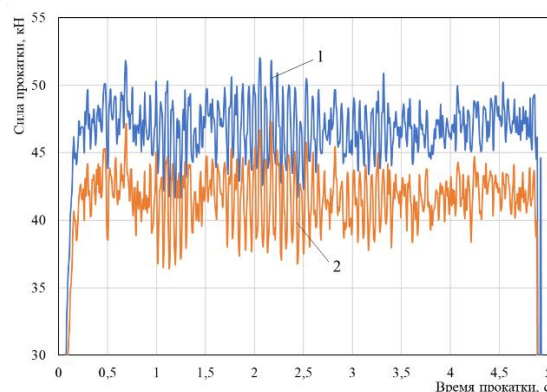


Рисунок 8. Влияние контактного трения на расчетную мощность прокатки при холодной деформации полос из меди М0 на лабораторном двухвалковом стане 150х235.

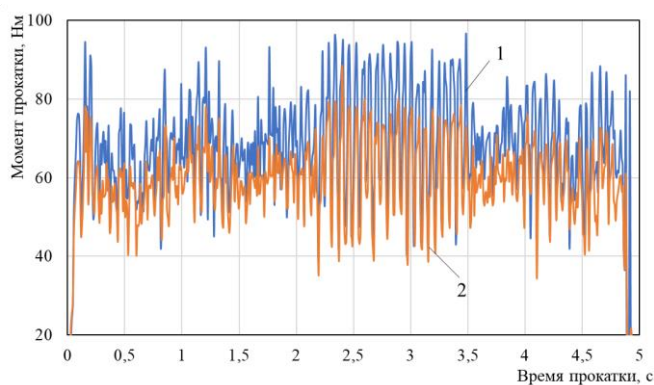
В четвертой главе выполнено компьютерное моделирование процессов прокатки полос из меди М0 на двухвалковом стане 150х235 в сухих валках и с четырьмя технологическими смазками: пальмовым маслом, смазка прокатная СПЗ (6%), индустриальном маслом И40 (5%) и подсолнечном маслом (5%). В условиях, когда обжатие полос при прокатке равно 20% и установлен зазор между валками $S_0 = 2,4$ мм.



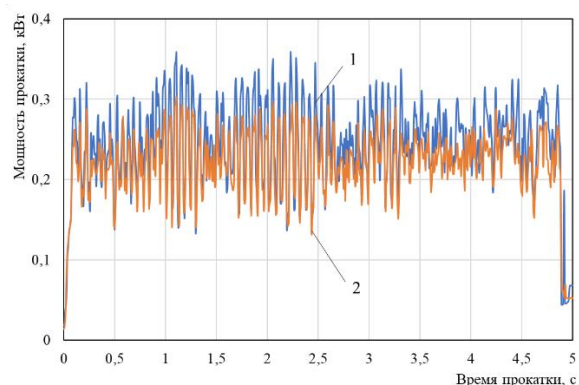
а) компьютерное моделирование процесса холодной прокатки на двухвалковом стане



б) влияние технологических смазок на силу прокатки: 1 – сухие валки; 2 – пальмовое масло



в) влияние технологических смазок на момент прокатки: 1 – сухие валки; 2 – пальмовое масло



г) влияние технологических смазок на мощность прокатки: 1 – сухие валки; 2 – пальмовое масло

Рисунок 9. Компьютерное моделирование процесса холодной прокатки на двухвалковом стане 150х235 и влияние технологических смазок на силовые, энергосиловые показатели процесса

Таблица 6. Максимальные силовые и энергосиловые показатели при компьютерном моделировании процесса холодной прокатки с различными технологическими смазками 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 6 показал, что наиболее эффективной является применение технологической смазки - пальмовое масло, по сравнению с прокаткой в сухих валках. При смазке с 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 прокаток на лабораторном стане и компьютерного моделирования с технологическими смазками могут быть использованы при разработке рациональных технологических режимов прокатки полос и лент на промышленных станах.

В пятой главе приведена новая технологическая схема производства лент для листовых штамповок точных деталей и результаты исследования влияния контактных условий, включая применение двух технологических смазок - индустриального масла И20 (5%) и И40 (5%), на деформационно-силовые показатели и потребляемую мощность при холодной прокатке лент

толщиной 0,55 мм из меди М0 на двухвалковом стане 175х300 машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам).

Процесс холодной прокатки медных лент выполнен по двум и трем проходам. Количество проходов выбиралось в зависимости от качества (точности) лент после прокатки. Разработанный технологический процесс при прокатке лент из медного сплава М0 на стане 175х300 приведен на рисунке 10.

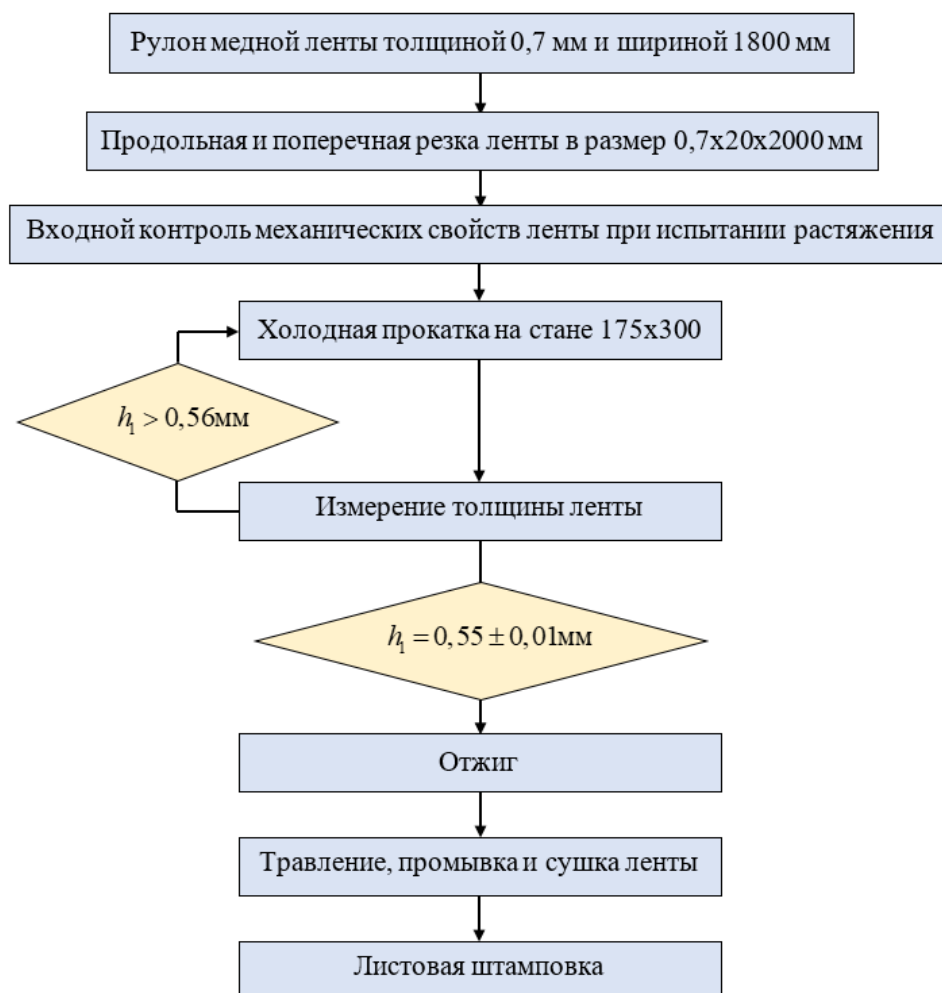


Рисунок 10. Технологическая схема производства лент из медных сплавов на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме.

На стане 175х300 прокатали 20 опытных медных М0 лент в мягком состоянии на толщину 0,55мм из подката размерами 0,7х20х2000 мм с разными условиями контактного трения, в том числе: 5 лент в сухих валках (без смазки); 5 лент при подаче воды на валки; 5 лент – с технологической смазкой - промышленное масло И40 (5%) и 5 лент – с технологической смазкой - промышленное масло И20 (5%). После прокатки измерили толщину готовых лент по длине с шагом 100мм. Результаты измерения позволяют оценить качества лент (по точности) по сравнению с требованиями листовой заготовки для штамповки точных деталей. Толщина

по всей длине лент после прокатки должна соответствовать диапазону $0,55 \pm 0,01$ мм.

Основные результаты опытных прокаток на стане 175х300 и расчёты приведены в таблице 7, 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; $\sigma_{в0}, \sigma_{в1}$ – временное сопротивление лент до и после прокатки; P – значение силы прокатки в начале (1), в середине (2) и в конце (3) длины каждой ленты, а также N – мощность прокатки.

Таблица 7. Деформационные и энергосиловые показатели при холодной прокатки лент из меди М0 на промышленном стане 175х300

Смазка, $f_{тр}$	Проход	Место	h_0 мм	h_1 мм	Δh мм	ε_Σ %	$\sigma_{т0}$ МПа	$\sigma_{т1}$ МПа	$\sigma_{в0}$ МПа	$\sigma_{в1}$ МПа	P кН	N кВт
Сухие валки, 0,09	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, 0,085	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%), 0,076	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%), 0,074	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	

Экспериментально установлено, что применение технологических

смазок - индустриальное масло 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 получить заданную точность толщины ленты для листовой штамповки деталей.

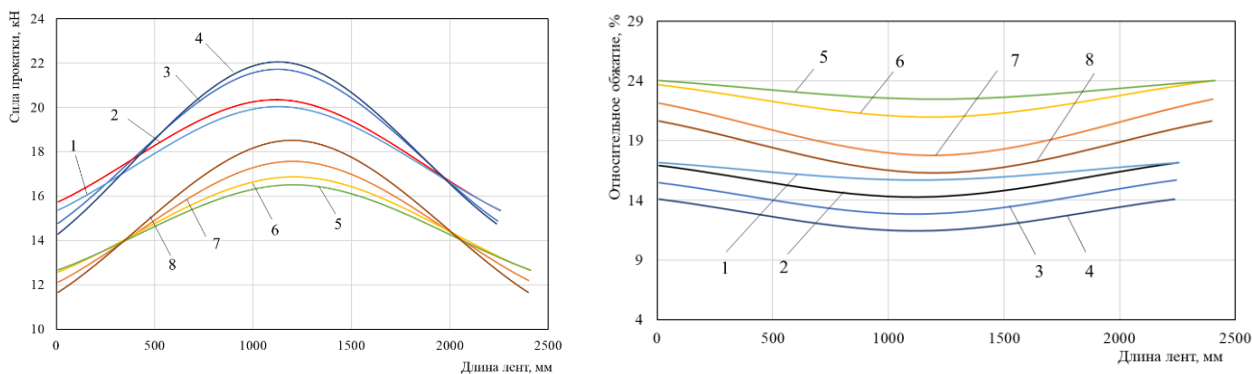


Рисунок 11. Влияние технологических смазок на силовые показатели и распределение обжатий по длине медных лент при холодной прокатки в первом (кривые 1-4) и втором (кривые 5-8) проходе на стане 175х300: 1, 5 – И20; 2, 6 – И40; 3, 7 – вода; 4, 8 – сухие валки.

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 толщина 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 влияния различных технологических смазок на распределение параметров и показателей прокатки по длине медных лент.

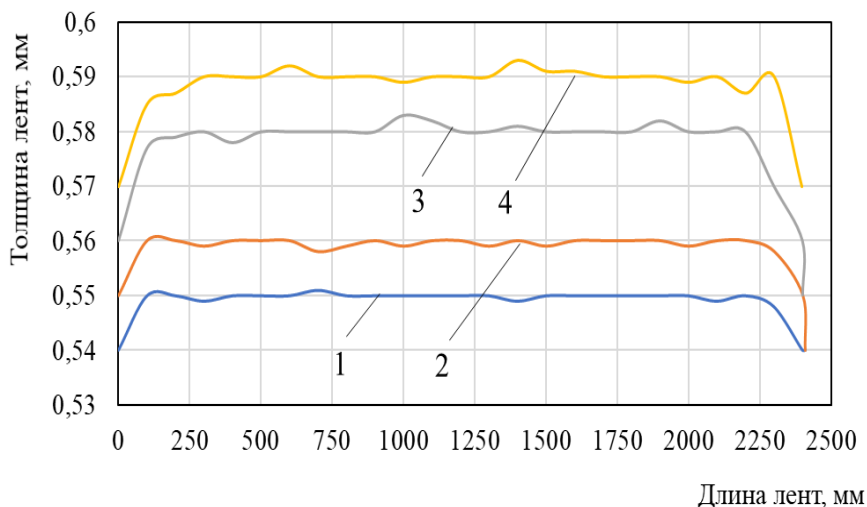


Рисунок 12. Распределение толщины по длине медных лент после второго прохода при холодной прокатки на стане 175х300: 1 – И20 (5%); 2 – И40 (5%); 3 – вода; 4 – сухие валки.

Из рисунка 12 видно, что распределение толщины по длине медных

лент после второго прохода при применении технологических смазок: индустриальное масло И20 (5%), кривая 1 и индустриальное масло И40 (5%), кривая 2 более равномерно, чем в сухих валках или с водой. Толщина лент по всей длине после второго прохода (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 ($h_1=0,55\pm0,01$ мм) машиностроительного завода в г. Донг Най. Показано, что применение смазки И20 позволяет прокатывать более тонкую ленту на стане. При прокатке в сухих валках или с водой толщина по длине лент после второго прохода не обеспечивает требования по точности ($h_1>0,56$ мм), поэтому в этом случае нужен третий проход. Таким образом, применение технологических смазок И20 (5%) и И40 (5%) на стане 175х300 позволяет уменьшить количество проходов прокатки лент с 3 до 2 и обеспечивать требуемую точность толщины по всей длине медных лент.

Исследовано влияние условий контактного трения на мощность при прокатке лент.

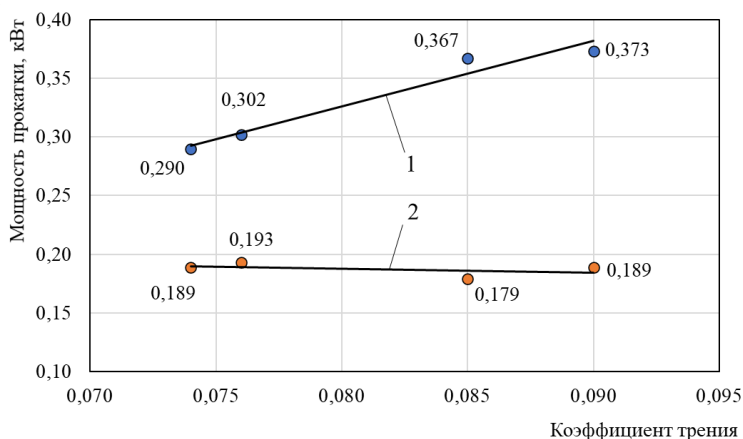


Рисунок 13. Влияние контактного трения при различных технологических смазках на мощность при холодной прокатки медных лент на стане 175х300: 1 — максимальная мощность прокатки в первом проходе; 2 — максимальная мощность прокатки во втором проходе

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 (М0) лент со технологической смазкой И20 и И40 на стане 175х300 за два прохода, обеспечив экономию потребляемой мощности и заданную толщину проката на машиностроительном заводе в городе Донг Най (Вьетнам).

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Шаталов Р.Л., Лукаш А.С, **Чан К.В.** Влияние смазок на деформационные, силовые показатели и размеры медных и латунных листов при прокатке. Известия Тульского государственного университета, 2019. Выпуск 12. С. 125-127. (ВАК)

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

Shatalov R.L, Pham V.H, **Tran V.Q.** Influence of Lubricants and Contact Pressure Models on the Rolling Power along Thin Aluminum Stripes. Metallurgist. 2021. № 5-6. PP 660-672. (SCOPUS)

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

4. Шаталов Р.Л, **Чан Ву Куанг**, Фам Вьет Хоанг. Определение механических свойств медных полос М0 по показателям твердости по Виккерсу и Бринеллю при холодной прокатке. Металлург. 2021. № 11. С. 51-54. (БАК)

Shatalov R.L, **Chan V.Q**, Pham V. H. Determination of mechanical properties of M0 copper strips by Vickers and Brinell hardness values during cold rolling. Metallurgist, Vol. 65, Nos. 11-12, March, 2022. Pp 1265-1272. (SCOPUS)

5. Шаталов Р.Л, **Чан В.К**, Фам В.Х. Исследование влияния смазочных материалов валков на деформационные и силовые показатели и размеры полос при холодной прокатке меди. Технология металлов. 2021. № 12. С. 40-46 (БАК).

6. Шаталов Р.Л, Фам В.Х, **Чан В.К**. Определение кривой упрочнения и механических свойств прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33 известного химического состава. Цветные металлы. 2021. №12. С. 70-74. (БАК)

Shatalov R.L, Fam V. Kh, **Chan V.K**. Determining the hardening curve and mechanical properties of rolled strips made of aluminum alloy AD33 with known chemical composition. Tsvetnye Metally. 2021. №12. Pp 70-74. (SCOPUS)

7. **В.К. Чан**, Р.Л. Шаталов, В.Х. Фам, С.Х. Хуинь. Исследование эффективности применения смазок валков при холодной прокатке медных лент на промышленном двухвалковом стане 175х300. Металлург. 2022. №6. С. 48-54. (БАК)

8. **Чан В.К**, Шаталов Р.Л. Исследование влияние смазок на показатели прокатки медных листов. Сборник докладов – Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2019». Московский политехнический университет. 2019. С. 249-252. (РИНЦ)

9. **Чан В.К**, Фам В.Х. определение коэффициента контактного трения по длине полос при холодной прокатке на двухвалковом стане. Сборник докладов – VI международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов. Донецкий национальный технический университет. 2020. С. 175-178. (РИНЦ)

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

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

12. Фам В.Х, **Чан В.К.**, Шаталов Р.Л. Компьютерное моделирование холодной прокатки полос из алюминиевого сплава АД33 с применением разных смазок валков. Сборник конференции – V международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация». Санкт-Петербург. 2022. С. 5-7. (РИНЦ)