

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ФАМ ВЬЕТ ХОАНГ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСЛОВИЙ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ С ЦЕЛЬЮ
СТАБИЛИЗАЦИИ ТОЛЩИНЫ ПО ДЛИНЕ ЛЕНТ СПЛАВА АД33 И
СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ 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 – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

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

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

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

теоретические исследования и усовершенствования методики и уравнений для повышения точности и надежности расчета давления и силы прокатки по длине полос.

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

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

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

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

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие задачи:

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

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

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

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

5. Уточнение методики и усовершенствование алгоритма расчета

напряжений и среднего давления на концевых участках и основной части тонкой полосы, которые позволяют повысить точность определения силовых показателей процесса прокатки.

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

7. Использование результатов компьютерного моделирования, инженерных расчетов и лабораторных экспериментов для разработки и внедрения рациональных режимов прокатки с технологическими смазками лент из алюминиевого сплава АД33, обеспечивающих сокращение времени на деформацию и снижение расходов на электроэнергию на стане 175х300 машиностроительного завода в городе Донг Най во Вьетнаме.

Научная новизна.

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

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

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

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

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

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

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

Материалы, оборудование и методы исследования.

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

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

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

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

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

Практическая значимость и реализация работы.

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

2. Разработано научно-методическое описание и подготовлена лабораторная работа, для проведения исследований на двухвалковом стане 150x235 по влиянию технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и качество алюминиевых полос, которые используются при преподавании дисциплины «Теория и технология прокатки» на кафедре

«Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета, а также в учебном процессе при проведении лабораторных и практических занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением» университета Чан Дай Нгхиа во Вьетнаме.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты реологических исследований алюминиевого сплава АД33 известного химического состава и определение механических свойств алюминиевого сплава АД33 до и после прокатки с обжатиями 10, 20, 30, 40, 50%. Зависимости основных механических свойств от твердости и связи между механическими показателями при холодной прокатки полос из алюминиевого сплава АД33.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2021» - Московский Политехнический Университет. (Москва.

26/3/2021);

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

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

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

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также научная и практическая значимость.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертации. Приведены методы определения напряжений и деформаций при пластической деформации металла, основанные на разработках теории пластичности в трудах советских, российских и зарубежных ученых.

Выполнен 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; вторая – факторы, влияющие на характер напряженного состояния: контактное трение, внешние зоны, натяжение полосы и другие переменные.

Проанализированы методы расчета давления и сил при холодной прокатке известных ученых: А. И. Целикова, А. А. Королева, Е. С. Рокотяна, М. Д. Стоуна, А. В. Третьякова и других ученых. Анализ показал, что при расчете по этим методам отклонения расчетных значений сил прокатки от экспериментальных данных, иногда, превышают 50%.

Анализ результатов исследований о зависимости механических свойств от степени деформации при холодной прокатке тонких полос и взаимосвязь между различными показателями механическими свойств алюминиевых сплавов показал, что они требуют дополнительного изучения. Эмпирические уравнения

для расчета механических свойств алюминиевого сплава АД33 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 изменения смазочных материалов валков влияет на силу прокатки и формирование толщины по длине полос, что практически не исследовано. Существует потребность в выявлении технологической смазки, обеспечивающей рациональное изменение силовых и деформационных показателей прокатки, а также толщины по длине полосы с учетом марки и химического состава сплава.

Во второй главе приведены результаты исследования механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 конкретного химического состава при холодной прокатке. Установлен конкретный химический состав полос и лент из алюминиевого сплава АД33, которые прокатываются на стане 170х300 на машиностроительном заводе города Донг Най во Вьетнаме.

Химический состав опытных полос из алюминиевого сплава определялся оптико-эмиссионным спектральным методом с использованием аналитического прибора PMI-MASTER. В результате был уточнен химический состав марки сплава АД33, % (мас.): >97,8016Al; 0,4754Si; 0,2979Fe; 0,2099Cu; 0,0945Mn; 0,9585Mg; 0,1Cr; 0,008Ni; 0,018Zn; 0,017Ti; <0,0001Be; 0,002Bi; 0,0017Ca; <0,0003Cd; 0,0018Co; <0,0006Pb; <0,001Sb; <0,0009Sr; 0,01V; 0,0006Zr. Химический состав алюминиевого сплава соответствует международному EN 573-3 и российскому стандарту ГОСТ 4784–2019.

Прокатали 9 полос исходной толщиной 3мм в мягком состоянии из алюминиевого сплава АД33 по три образца с обжатием 10, 20 и 30% в сухих валках на двухвалковом стане 150х235 в лаборатории кафедры «ОМД и АТ» Московского политехнического университета.

Были исследованы основные показатели механических свойств алюминиевых полос до и после прокатки на испытательной машине Zwick/Roell Z250 в лаборатории Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Испытания образцов на растяжение проводились по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

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

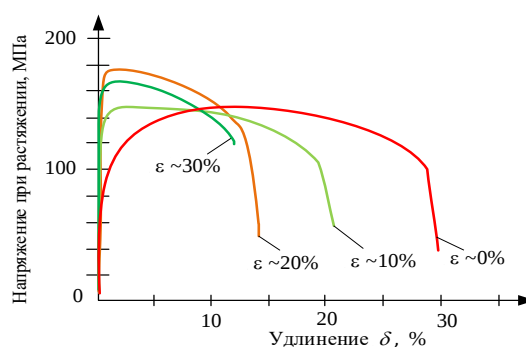


Рисунок 1. Кривые напряжений при растяжении образцов из алюминиевого сплава АД33.

Таблица 1 - Деформационные показатели холодной прокатки и механических свойства отожженных и прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33

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

В таблице 1 обозначено: h_0 и h_1 – толщина полосы до и после прокатки; $\sigma_{0,2}$, σ_B – экспериментальные величины предела текучести и временного сопротивления, МПа; δ – относительное удлинение образцов при растяжении, %. Результаты испытания на растяжение позволяют построить зависимости основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от относительной обжатия (см.рис.2)

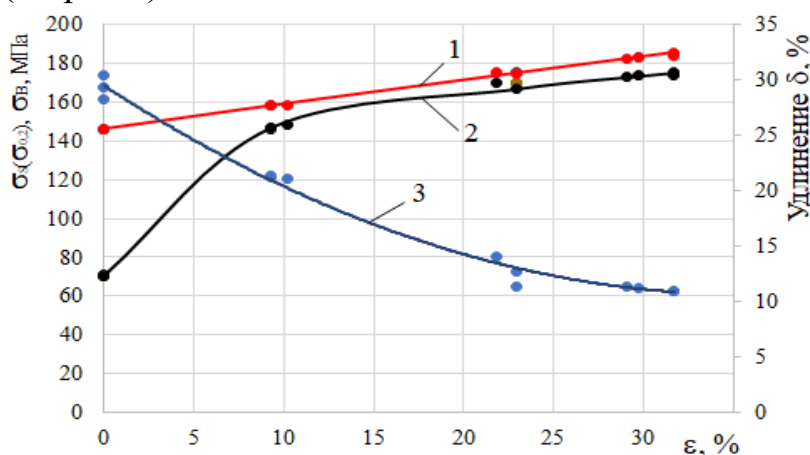


Рисунок 2 – Зависимость временного сопротивления σ_B (1), сопротивления деформации σ_s (2) и относительного удлинения δ (3) от относительной обжатия ε алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке.

На основании результатов испытаний образцов на растяжение, получены регрессионные уравнений, для определения сопротивления деформации $\sigma_{0,2}$ (σ_s), временного сопротивления σ_B и относительного удлинения δ сплава АД33 от обжатия при прокатке:

$$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = 70,5 + 43,21\varepsilon^{0,256}, \quad R^2 = 0,98 \quad (1)$$

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

$$\delta = 0,0148\varepsilon^2 - 1,073\varepsilon + 29,742, R^2 = 0,99 \quad (3)$$

Установлены закономерности изменения прочностных, пластических характеристик от степени холодной деформации полос алюминиевого сплава АД33 известного химического состава. Показано на рисунке 2а, что временное сопротивление σ_B и предел текучести $\sigma_{0,2}$ (σ_s) с увеличением обжатия возрастают с различной интенсивностью: σ_B увеличивается монотонно практически по линейному закону; $\sigma_{0,2}$ (σ_s)-интенсивно возрастает с 70 до 160 МПа при обжатии от 0 ÷ 15%, а затем медленно увеличивается до 173,5 МПа при $\varepsilon = 30\%$. Показатель пластичности - δ уменьшается с 29,35 до 11,2% по параболическому закону второй степени.

Исследовали на установке METKON DUROLINE МН-6 влияние обжатия на формирования твердости полосы. Результаты определения твердости по Виккерсу (HV) и Бринеллю (HB) отожженных образцов и полос из алюминиевого сплава АД33 после холодной прокатки с различными обжатиями (10, 20 и 30%) представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Твердость полос из алюминиевого сплава АД33 до и после прокатки с различными обжатиями

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

Результаты измерения твердости отожженных образцов и полос из алюминиевого сплава АД33 после холодной прокатки с различными обжатиями (10, 20 и 30%), приведенные в таблице 2 позволяют построить графики зависимости твердости HV и HB от относительной обжатия (см. рис. 3).

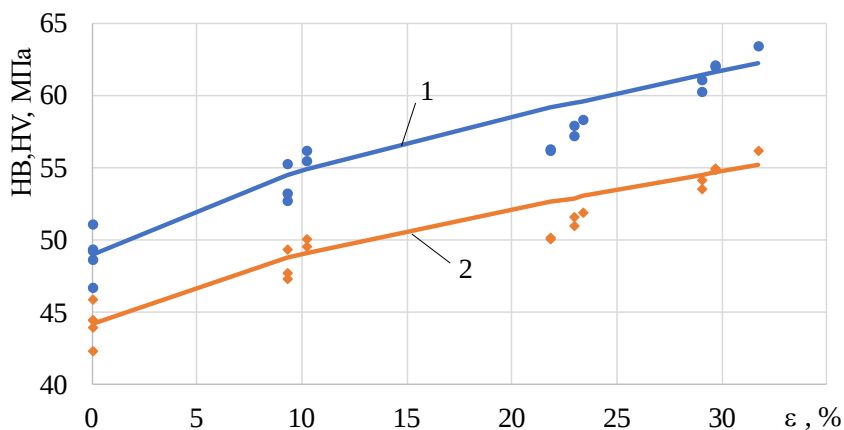


Рисунок 3 – Зависимость твердости HV (1) и HB (2) от относительной обжатия ε алюминиевого сплава АД33 при холодной прокатке.

Показано, что с увеличением обжатия от 0 до 30% твердость HV и HB увеличивается монотонно практически по линейному закону: HV - возрастает с 49,0 до 61,7 и HB - медленно возрастает с 44,2 до 54,7 при увеличении обжатия от 0 ÷ 30%.

На основании результатов измерений твердости образцов, получены регрессионные уравнения, для определения показателей твердости по HV и HB сплава АД33 от относительного обжатия при прокатке:

$$HV = 49 + 1,102\varepsilon^{0,72}, \quad R^2 = 0,91 \quad (4)$$

$$HB = 44,2 + 0,943\varepsilon^{0,71}, \quad R^2 = 0,91 \quad (5)$$

Получены зависимости и построены графики изменения основных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения от показателей твердостей прокатанных полос из алюминиевого сплава АД33. Величины предела прочности (временного сопротивления) σ_B связаны с показателями твердости (HB или HV) линейными зависимостями, а предела текучести (сопротивления деформации) $\sigma_{0,2}$ (σ_s) увеличивается с 70 до 174 МПа и показатель пластичности δ уменьшается с 29,35 до 11,2% с ростом твердости проката по параболическому закону второй степени (рис. 4).

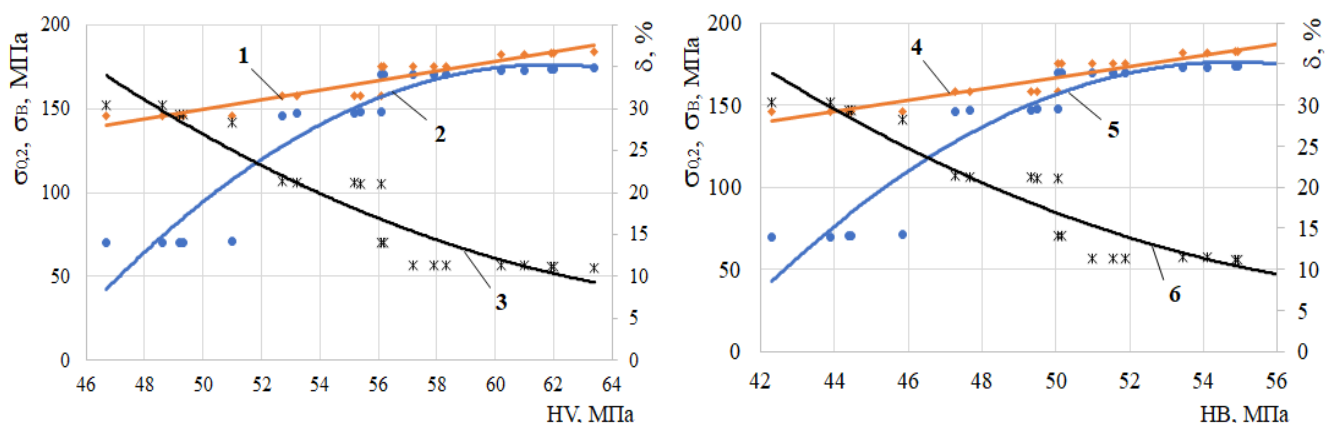


Рисунок 4. Зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (сопротивления деформации σ_s) от твердости по Виккерсу (HV) (2) и по Бринеллю (HB) (5), временного сопротивления σ_B от твердости по Виккерсу (HV) (1) и по Бринеллю (HB) (4), относительного удлинения δ от твердости по Виккерсу (HV) (3) и по Бринеллю (HB) (6) сплава АД33 при холодной прокатке

Получены адекватные регрессионные уравнения для расчета основных механических свойств от показателей твердости алюминиевого сплава АД33 при прокатке полос с обжатием до 30% (табл. 3).

Таблица 3. Регрессионные уравнения для определения основных механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 по показателям твердости.

Величина	Эмпирические уравнения	Коэффициент R^2
Предел текучести	$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = -0,583HV^2 + 72,13HV - 2054,$	$R^2 = 0,90$
	$\sigma_{0,2}(\sigma_s) = -0,856HB^2 + 93,83HB - 2395,$	$R^2 = 0,90$
Временное сопротивление	$\sigma_B = 2,858HV + 6,576,$	$R^2 = 0,89$
	$\sigma_B = 3,463HB - 6,453,$	$R^2 = 0,89$
Относительное удлинение	$\delta = 0,0475HV^2 - 6,702HV + 243,31,$	$R^2 = 0,89$
	$\delta = 0,0697HB^2 - 8,644HB + 274,85,$	$R^2 = 0,89$

Третья глава посвящена исследованию влияния различных технологических смазок на деформационно-силовые и энергосиловые параметры, а также усовершенствованию моделей среднего давления для повышения точности расчета сил прокатки по длине тонких полос и лент из алюминиевых сплавов.

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

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

$$\mu = f(\varepsilon, v_B, \vartheta_{50}, R_z, K_{cm}), \quad (6)$$

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

Получили следующие результаты расчета коэффициента контактного трения: с керосином - $\mu = 0,071$; со смазкой пальмовым маслом – $\mu = 0,074$; с СПЗ – $\mu = 0,074$; с И40 (5%) – $\mu = 0,075$ и с подсолнечным маслом (5%) – $\mu =$

0,08. При холодной прокатке алюминия в сухих валках коэффициент трения составляет $\mu = 0,095$.

Основные результаты опытных прокаток полос на стане 150x235(расчеты, параметры и показатели процесса) в трех участках длины проката, в начале (1), в середине (2) и в конце (3) до и после деформации: h_0, h_1 – толщина полос до и после прокатки, мм; δh -продольная разнотолщинность полос; b_0, b_1 – ширина полос до и после прокатки, мм; ε - относительное обжатие, %; $P_z, P_{сч}$ – измеренное и расчетное значение силы прокатки, кН; ΔP – погрешность расчетных значений сил прокатки, % приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры и показатели процесса прокатки по длине полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц с технологическими смазками на стане 150x235

Сплав	Смазка, μ	Место	h_0 , мм	b_0 , мм	h_1 , мм	b_1 , мм	δh , мм	l_1 , мм	ε , %	P_z , кН	$P_{сч}$, кН	ΔP , %
АД33	Без смазки, 0,095	1 (Н)	3,02	25,60	2,35	26,13	0,04	0	22,19	23,68	22,90	3,31
		2 (С)	3,04	25,60	2,39	26,00		119,5	21,38	42,86	37,38	12,79
		3 (К)	3,02	25,60	2,33	26,29	0,06	239	22,85	23,28	23,38	-0,42
	СПЗ (6%), 0,08	1 (Н)	3,03	25,48	2,34	26,10	0,02	0	22,77	24,14	22,86	5,29
		2 (С)	3,02	25,42	2,36	25,59		120	21,85	39,65	36,78	7,25
		3 (К)	3,03	25,44	2,33	26,19	0,03	240	23,10	24,01	23,08	3,86
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	3,04	25,68	2,35	26,25	0,02	0	22,70	24,24	22,89	5,59
		2 (С)	3,04	25,47	2,37	25,72		120,5	22,04	37,58	36,98	1,59
		3 (К)	3,05	25,52	2,34	26,51	0,03	241	23,28	23,31	23,32	-0,05
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	3,03	25,65	2,35	26,19	0,01	0	22,44	24,71	22,63	8,42
		2 (С)	3,03	25,45	2,36	25,61		120,5	22,11	37,57	36,89	1,81
		3 (К)	3,02	25,48	2,31	26,09	0,05	241	23,51	23,4	23,11	1,22
	Под.Масло, (5%) 0,074	1 (Н)	3,00	25,34	2,33	25,88	0,03	0	22,33	24,35	22,18	8,90
		2 (С)	3,03	25,35	2,36	25,58		120,5	22,11	37,57	36,80	2,06
		3 (К)	3,02	25,37	2,31	26,35	0,05	241	23,51	23,45	23,18	1,15
	Керосин 0,071	1 (Н)	2,00	25,39	1,55	26,10	0,01	0	22,50	19,01	18,23	4,11
		2 (С)	2,00	25,45	1,56	26,00		120,5	22,00	35,99	32,25	10,39
		3 (К)	2,00	25,53	1,54	26,50	0,02	241	23,00	20,79	18,67	10,21
АМц	Без смазки, 0,095	1 (Н)	1,90	24,0	1,53	24,26	0,02	0	19,47	13,43	12,46	7,24
		2 (С)	1,90	24,0	1,55	24,25		90,0	18,42	22,05	19,72	10,55
		3 (К)	1,90	24,0	1,52	24,48	0,03	180	20,00	13,75	12,72	7,48
	И40 (5%), 0,075	1 (Н)	1,90	24,0	1,51	24,46	0,01	0	20,53	13,60	12,65	7,00
		2 (С)	1,90	24,0	1,52	24,30		89,5	20,00	20,86	20,48	1,83
		3 (К)	1,90	24,0	1,51	24,45	0,01	179	20,53	13,82	12,65	8,50
	Пальмовое масло, 0,074	1 (Н)	1,90	24,0	1,50	24,68	0,02	0	21,05	13,70	12,89	5,90
		2 (С)	1,90	24,0	1,52	24,30		90,0	20,00	20,16	20,45	-1,42
		3 (К)	1,90	24,0	1,51	24,85	0,01	180	20,53	13,95	12,74	8,70

Сплав	Смазка, μ	Место	h_0 , мм	b_0 , мм	h_1 , мм	b_1 , мм	δh , мм	l_1 , мм	ε , %	P_z , кН	$P_{сч}$, кН	ΔP , %
	Керосин, 0,071	1 (Н)	1,90	24,0	1,49	24,23	0,02	0	21,58	13,75	12,93	5,98
		2 (С)	1,90	24,0	1,51	24,12		92,0	20,53	20,85	20,70	0,70
		3 (К)	1,90	24,0	1,49	24,66	0,02	184	21,58	14,05	13,04	7,16

Установлены количественные закономерности влияния различных технологических смазок на двухвалковом стане 150x235 на деформационно-силовые показатели холодной прокатки и толщину по длине тонких полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц.

Влияние технологических смазок на силовые и деформационные показатели основной части полосы. Представлены графики влияния различных условий контактного трения на силу прокатки и деформационные показатели прокатки при холодной прокатки полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц с одинаковыми обжатиями $\varepsilon \approx 20\%$. Применение технологических смазок позволяет уменьшить силу прокатки, увеличить обжатие металла и стабилизировать толщину по длине полос на выходе из стана без изменения зазора между валками (рис. 5).

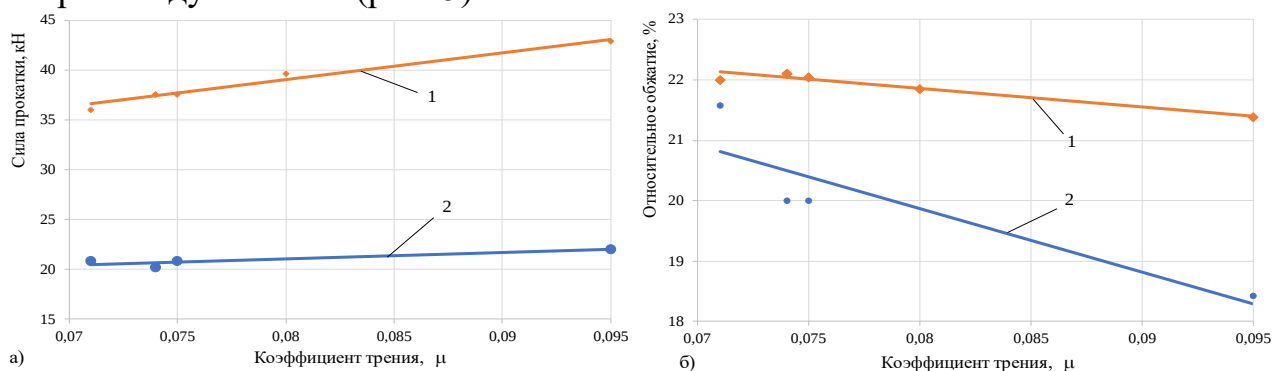
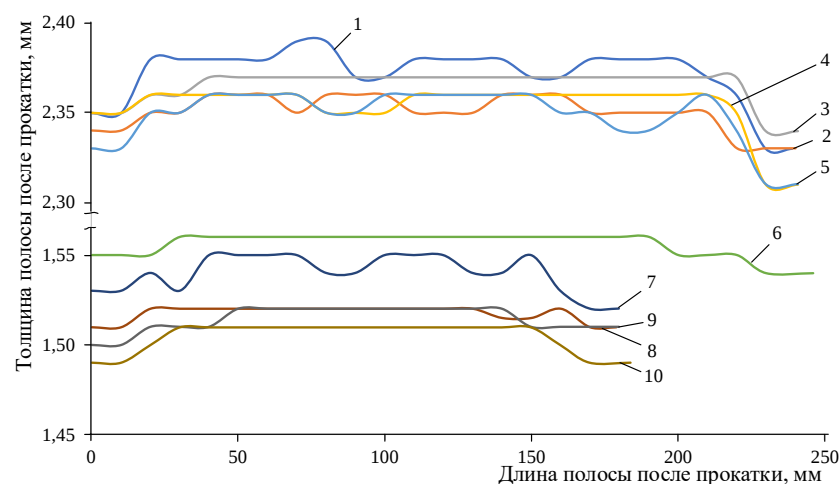


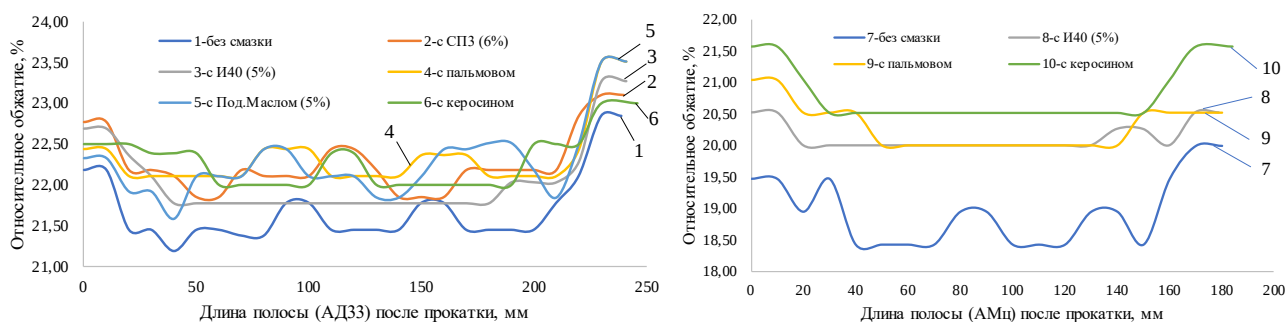
Рисунок 5 – Влияние коэффициента контактного трения, соответствующего различным смазкам на деформационно-силовые показатели при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов АД33 (1) и АМц (2) на стане 150x235
а - Силы прокатки; б – Относительное обжатие.

Экспериментально установлено, что при прокатке основной части полос из сплава АД33 сила прокатки уменьшается на 3,21 кН (7,5%), а относительное обжатие ε увеличивается на 0,47 (2,2%) при технологической смазке СПЗ (6%); при смазке индустриальным маслом И40 (5%) - на 5,28 кН (12,3%) и на 0,66 (3,0%); подсолнечным маслом (5%) – на 5,29 кН (12,3%) и на 0,73 (3,3%); пальмовым маслом – на 5,29 кН (12,3%) и на 0,73 (3,3%) и керосином – на 6,87 кН (16,0%) и 0,62 (2,8%) по сравнению с деформацией в сухих валках. При прокатке полос из сплава АМц сила прокатки уменьшается на 1,19 кН (5,4%), а относительное обжатие ε увеличивается на 1,58 (7,9%) при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%); пальмовым маслом – на 1,89 кН (8,6%) и 1,58 (7,9%) и керосином – на 1,2 кН (5,4%) и 2,11 (10,3%) по сравнению с деформацией в сухих валках.

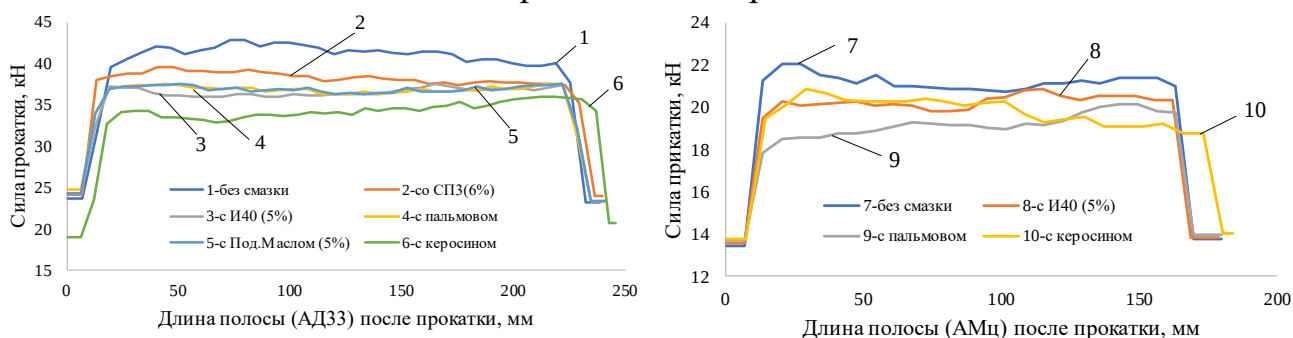
Влияние технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких алюминиевых полос. Установлены количественные закономерности распределения толщины по длине полос после прокатки с различными технологическими смазками.



а – влияние смазок на толщину по длине тонких алюминиевых полос при холодной прокатке



б – влияние смазок на относительной обжатии по длине тонких алюминиевых полос при холодной прокатке



в – влияние смазок на силу прокатки по длине тонких алюминиевых полос при холодной прокатке

Рисунок 6 – Влияние технологических смазок на деформационно-силовые показатели прокатки и толщину по длине тонких алюминиевых полос из сплавов АД33 и АМц при холодной прокатке:

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

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

Результаты исследования подтвердили известные положения об уменьшении толщины полос на концевых участках по сравнению с серединой полосы. Продольная разнотолщинность полос изменяется в пределах 0,01...0,06 мм в зависимости от деформационных условий прокатки и применяемых смазочных материалов. Показано, что применение технологических смазок позволяет в 1,6-2,0 раза уменьшать продольную разнотолщинность полос. Результаты эксперимента и сравнение с величинами самой большой продольной разнотолщинности при прокатке полос из алюминиевых сплавов в сухих валках показали, что при смазке СПЗ (6%) продольная разнотолщинность ниже, чем при сухих валках на 50% (АД33); при смазке индустриальным маслом И40 (5%) - на 50% (АД33) и 66,7% (АМц); подсолнечным маслом (5%) и пальмовым маслом - на 16,7% (АД33) и 33,3% (АМц); и керосином - на 66,7% (АД33) и 33,3% (АМц) (см. рис. 6.а).

Результаты экспериментов, приведенные в таблице 4 и на рисунке 6, показали, что применение различных технологических смазок при холодной прокатке полос из алюминиевых сплавов существенно влияет на изменения деформационных и силовых показателей по длине полос. Впервые установлено, что при прокатке со смазками разница между деформационными и силовыми показателями в среднем и концевом участках при прокатке алюминиевых полос со смазками меньше, чем при прокатке полос в сухих валках. Разница степени деформации концевых участков и средней части полос АД33 уменьшается от 3,62% и 6,42% при прокатке в сухих валках до 1,47% и 4,35% при прокатке со смазками на передней и задней части соответственно. В случае прокатки полос АМц такие же результаты получены: от 5,41% и 7,89% при прокатке в сухих валках до 2,56% и 2,56% при прокатке со смазками на передней и задней части соответственно. Неравномерность распределения сил прокатки уменьшается от 19,18 кН (44,8%) на переднем и 19,58 кН (45,7%) на заднем участке при прокатке в сухих валках до 12,86 кН (34,2%) и 14,17 кН (37,7%) соответственно при прокатке полос АД33 со смазками и уменьшается от 8,62 кН (39,1%) на переднем и 8,3 кН (37,6%) на заднем участке при прокатке в сухих валках до 6,46 кН (32,0%) и 6,21 кН (30,8%) соответственно при прокатке полос из сплава АМц со смазками.

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

По сравнению с деформацией в сухих валках, сила при прокатке со смазками на переднем и заднем участке больше, чем при прокатке без смазки, разница составляет $0,17 \div 1,03$ кН и $0,03 \div 0,73$ кН соответственно для сплава АД33 и составляет $0,17 \div 0,32$ кН и $0,07 \div 0,3$ кН соответственно для сплава АМц. А в середине полос разница сил прокатки ниже на $3,21 \div 6,87$ кН для сплава АД33 и $1,19 \div 1,89$ для АМц. Относительное обжатие в средней и концевых участках полос при прокатке со смазками больше, чем при прокатке в сухих валках соответственно на $0,66 \div 2,57\%$; $2,16 \div 3,3\%$ и $0,66 \div 2,82\%$ для сплава АД33; на $5,13\% \div 9,76\%$; $7,89\% \div 10,26\%$ и $2,56\% \div 7,35\%$ для сплава АМц.

Экспериментальным путем установлена существенная неравномерность распределения силы прокатки по длине алюминиевых полос без применения технологических смазок. В установившемся периоде прокатки величина усилия прокатки в среднем в 1,5 раза больше, чем на концевых участках полосы.

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

Усовершенствование моделей контактного давления для повышения точности расчета сил прокатки по длине тонких алюминиевых полос

Проектирование режимов прокатки полос и листов предполагает использование адекватных моделей для расчета контактного давления и силы прокатки, в том числе и по длине полосы. Требуется количественная оценка влияния определяющих факторов на давление и силу прокатки. Известно, что определяющее влияние, наряду с площадью контактной поверхности металла с валками, на формирование силы прокатки оказывает контактное давление, которое зависит от сопротивления металла деформации и напряженного состояния полосы.

С использованием результатов экспериментального исследования при прокатке с обжатием 20% полос из алюминиевого сплава АД33 со смазкой И40 (5%), проведем количественный анализ точности известных и адекватности предлагаемых уравнений расчета давлений и сил при деформации различных участков по длине полосы. Исходные данные приведены в таблице 4.

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

$$P = p_{cp} \cdot F_k, \quad (7)$$

где p_{cp} - среднее контактное давление металла на валки, Н/мм² (МПа); F_k – площадь (мм²) контакта металла с валком определяется длиной l_d и шириной b_{cp} очага деформации:

$$F_k = l_d \cdot b_{cp} = \sqrt{\Delta h \cdot R} \cdot b_{cp}, \quad (8)$$

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

На основе обработки экспериментальных данных методом математической статистики и анализа факторов, влияющих на контактное давление при прокатке полос без натяжения, с целью повышения точности расчета контактного давления на основной части тонкой полосы можно использовать формулу, полученную Р.Л. Шаталовым и М.А. Куликовым, для расчета среднего контактного давления:

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_{scp} \cdot n_{cp} \cdot (n_{\sigma} \cdot n_b)^{0,5}, \quad (9)$$

где: $\sigma_{ср}$ - среднее значение сопротивления деформации, Н/мм²; $n_{ср}$ - коэффициент напряженного состояния; n_b - коэффициент, учитывающий влияние внешних частей полосы на очаг деформации; n_{σ} - коэффициент, учитывающий влияние внешних зон на очаг деформации.

Коэффициент n_b учитывающий влияние внешних частей полос и лент из алюминиевого сплава АД33 на очаг деформации предложено рассчитывать по формуле:

$$n_b = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{ср}} \frac{h_1}{h_{ср}}, \quad (10)$$

где: σ_{s1} и h_1 - сопротивление металла деформации и толщина полосы на выходе из валков.

По результат эксперимента, длина очаг деформации составила $1 \leq l_d/h_{ср} \leq 4$, тогда значение коэффициента n_{σ} можно определить по формуле:

$$n_{\sigma} = (l_d/h_{ср})^{0,5}, \quad (11)$$

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

$$n_{ср} = \frac{2(1-\varepsilon)h_H}{\varepsilon(\delta-1)h_1} \left(\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta} - 1 \right), \quad (12)$$

где: $\delta = 2\mu l_d / \Delta h$; $h_H = \sqrt{h_0 h_1}$ - толщина полосы в нейтральном сечении очага деформации, мм.

Однако, в установившийся период прокатки, при сравнении расчетных значений сил с использованием уравнения (12), для определения значения коэффициента $n_{ср}$ приводит к большому отклонению расчетной силы от измеренный при прокатке тонких алюминиевых полос. Погрешность может составлять более 170%. Поэтому при прокатке тонких полос и лент из алюминиевого сплава АД33 целесообразно использовать другое уравнение для определения $n_{ср}$.

М. Д. Стоун при рассмотрении процесса прокатки заменил схему на осадку металла между двумя параллельными плитами и предложил определять средний коэффициент напряженного состояния $n_{ср}$ по формуле:

$$n_{ср} = \frac{h_{ср}}{\mu \cdot l_d} \left[e^{\frac{\mu \cdot l_d}{h_{ср}}} - 1 \right], \quad (13)$$

Расчет с использованием формулы (13) для определения значения коэффициента $n_{ср}$ обеспечивает малое отклонение расчетной силы от измеренной (1,6%). Таким образом, в этом случае применение формулы (13) достаточно надежно для определения давления и силы прокатки при холодной деформации лент из сплава АД33.

Проведен расчет давления и силы прокатки в начале (н) и конце (к) прокатки полосы в зонах 1 и 3 соответственно. На входных и выходных

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

$$p_{cp(n)(\kappa)} = 1,15 \cdot \sigma_{scr} \cdot m, \quad (14)$$

или

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

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

Решение задачи снижения энергосиловых параметров прокатки с применением технологическим смазок.

Исследовали влияние различных технологических смазок на момент M и мощность прокатки N .

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

$$N_{пр} = M_b \cdot \omega = \frac{M_b \cdot V}{R}, \quad (16)$$

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

Результаты исследования условия контактного трения на момент и мощность прокатки приведены в таблице 5. В таблице: P_s - максимальная сила прокатки, кН; $M_{тр}$ - момент трения в подшипниках валков, кНм; $M_{пр}$ - момент прокатки, кНм; M_b - крутящий момент, кНм; $N_{пр}$ - мощность прокатки, кВт.

Таблица 5. Влияние технологических смазок на энергосиловые параметры при холодной прокатке с обжатием 20% тонких полос из алюминиевых сплавов АД33 и АМц на двухвалковом стане 150х235

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

Адекватное вычисление момента и мощности прокатки позволяет определить потребную мощность двигателя прокатного стана и оценить прочность деталей главной линии прокатного стана. По результатам вычислений построены графики влияния коэффициента контактного трения, соответствующего исследуемым технологическим смазкам на суммарный момент прокатки и потребляемую мощность (рис. 7).

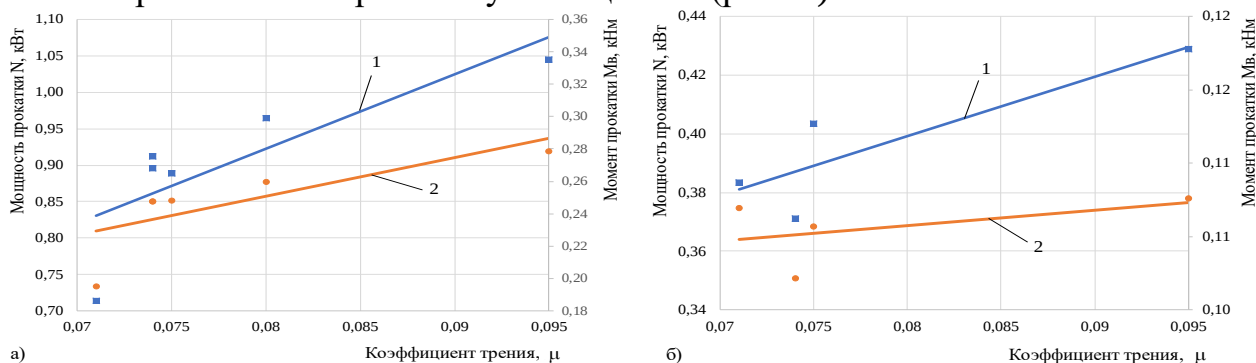


Рисунок 7 – Влияние коэффициента контактного трения на расчетную мощность и момент прокатки при холодной деформации ~20% тонких полос из алюминиевых сплавов АД33 (а) и АМц (б) на лабораторном двухвалковом стане 150х235: 1 – момент прокатки; 2 – мощность прокатки.

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

Проверенная адекватность моделей позволяет рекомендовать блок-схему алгоритма расчета давления и сил прокатки по длине тонких полос из алюминиевых деформируемых сплавов, которая приведена на рисунке 8.

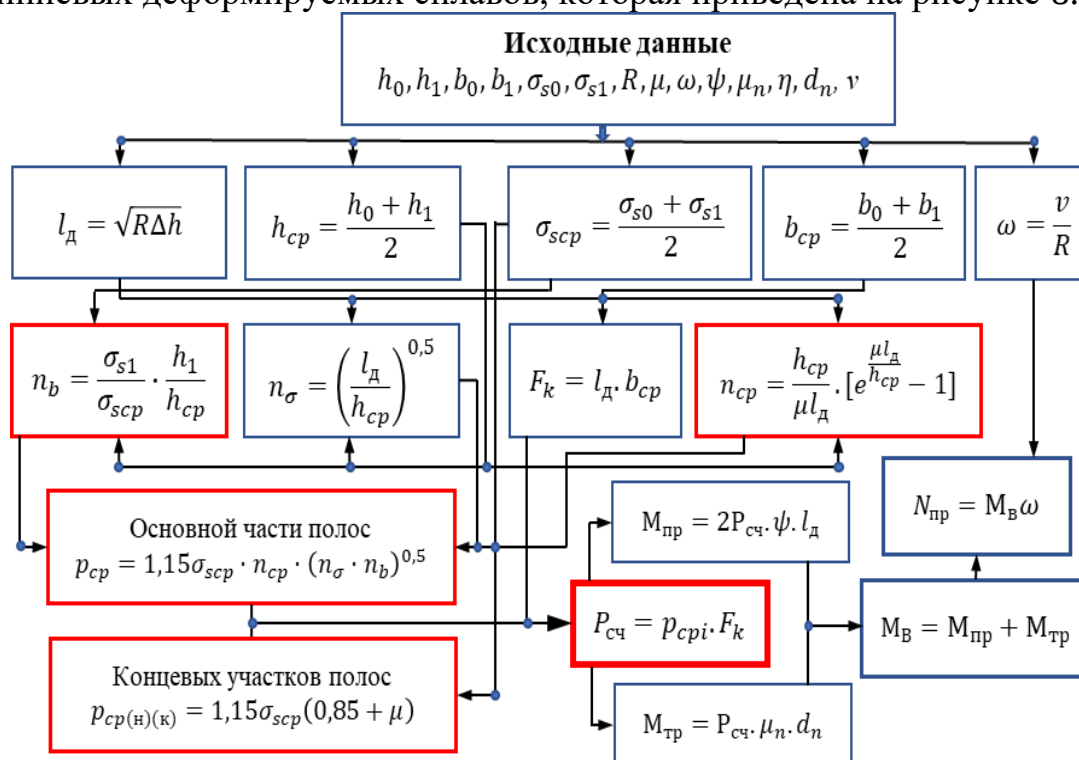


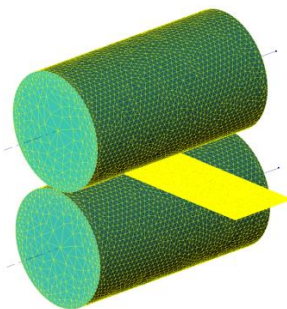
Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма расчета давления и энергосиловых показатели холодной прокатки по длине тонкой полосы или ленты с различными технологическими смазками

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования процесса прокатки лент толщиной 0,55мм, шириной 100мм из сплава АД33 с разными условиями контактного трения на промышленном двухвалковом стане 175х300 с фактическим диаметром валков 167 мм и скоростью прокатки 0,27м/с. Результаты исследования позволили оценить положительное влияние технологических смазок на распределение силы, момента и мощности прокатки по длине лент из алюминиевого сплава АД33.

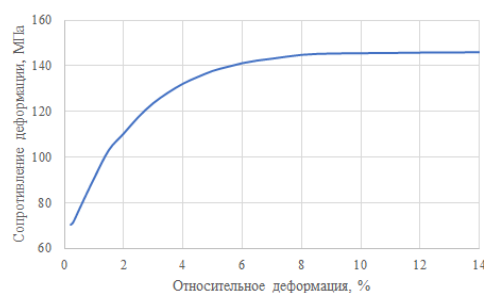
3D-модель процесса прокатки лент соответствует параметрам прокатного стана 175х300 на машиностроительном заводе в городе Донг Най (Вьетнам) (рис. 9а).



а)



б)



в)

Рисунок 9 - Промышленный двухвалковый стан 175х300 (а) и его 3D модель (б) и модель материала из алюминиевого сплава АД33 (в).

Моделирование процессов прокатки лент из подката толщиной 0,7мм проводили с одинаковыми обжатиями $\varepsilon \approx 20\%$ (зазор между валками $S = 0,55$ мм) и разными условиями контактного трения между полосой и валками: без смазки ($\mu = 0,095$); со смазками СПЗ ($\mu = 0,08$); с индустриальным маслом И40 (5%) ($\mu = 0,075$); с пальмовым маслом ($\mu = 0,074$) и керосином ($\mu = 0,071$).



Рисунок 10 - Распределение сил (а), момента (б) и мощности (в) по длине участка лент при моделировании прокатки с обжатием 20% из алюминиевого сплава АД33:

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

Расчет силовых и энергосиловых параметров выполнен в вычислительных средах конечно-элементного анализа по схеме процесса продольной прокатки. Данные компьютерного моделирования процесса прокатки полос из алюминиевого сплава АД33 с различными технологическими смазками представлены на рисунке 10 и в таблице 6.

Таблица 6 – Влияние технологических смазок на максимальные силы, моменты и мощности при компьютерном моделировании процесса холодной прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 на 3D модели стана 175х300

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

Результаты моделирования показали, что при применении технологических смазок силовые и энергосиловые параметры снижается, по сравнению с деформацией в сухих валках. При моделировании процесса прокатки лент из сплава АД33 с технологической смазкой И40 (5%) по сравнению с прокаткой в сухих валках сила прокатки уменьшается на 6,72 кН (7,9%), момент прокатки на 0,026 кНм (12,6%) и мощность прокатки на 0,098 кВт (12,8%). При моделировании прокатки лент с технологической смазочной керосин сила прокатки уменьшается на 8,8%, момент на 18,8% и мощность прокатки на 18,6% по сравнению с прокаткой в сухих валках. 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 усовершенствованная технологическая схема производства лент, которые используются для штамповки точных деталей, а также результаты исследования по влиянию контактных условий, включая смазку валков индустриальным маслом И40 (5%), на деформационно-силовые показатели и потребляемую мощность при холодной прокатке лент толщиной 0,55 мм из алюминиевого сплава АД33 на двухвалковом стане 175х300 (Рис. 9а) машиностроительного завода в городе Донг Най (Вьетнам).

Процесс холодной прокатки алюминиевых лент выполнен по двум и трем проходам. Число проходов выбирали в зависимости от качества (точности и механических свойств) лент после прокатки. Разработанная технологическая схема прокатки лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175х300 приведена на рисунке 11.

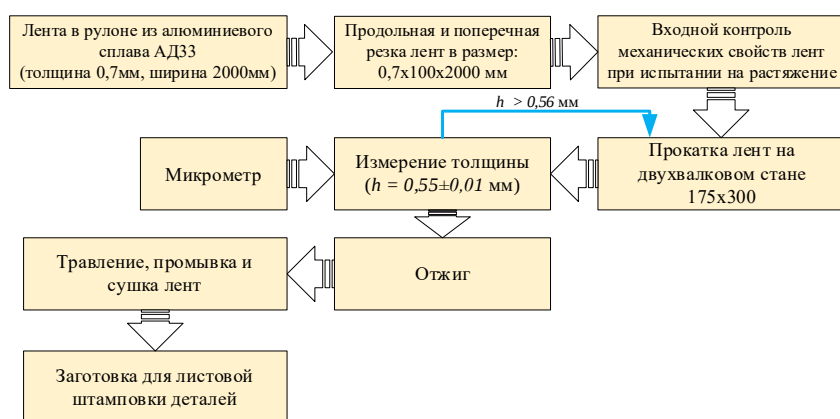


Рисунок 11 – Технологическая схема производства тонких лент из алюминиевого сплава АД33 на машиностроительном заводе г. Донг Най (Вьетнам)

Опытную прокатку лент осуществляли на двухвалковом стане 175х300 с фактическим диаметром валков 167 мм и скоростью прокатки 0,266м/с. На стане 175х300 прокатали 30 опытных лент на толщиной 0,55мм из алюминиевого сплава АД33 из подката размерами 0,7х100х2000 мм с разными условиями контактного трения, в том числе 10 лент в сухих валках (без смазки), 10 лент при подаче воды на валки и 10 лент - со смазкой валков индустриальным маслом И40 (5%). Результаты измерения позволяют оценить качества лент по точности по сравнению с требованиями листовой заготовки для штамповки деталей. Толщина по длине лент после прокатки должна находится в диапазоне $0,55 \pm 0,01$ мм. Измерение толщины лент до и после прокатки проводили электронным микрометром с погрешностью $\pm 0,01$ мм, а длины рулеткой с погрешностью измерения $\pm 0,1$ мм.

Основные результаты опытных прокаток на стане 175х300 и расчеты приведены в таблице 7, включая параметры и показатели процесса прокатки: h_0 , h_1 – толщина лент до и после прокатки, мм; $\varepsilon_s = (\sum_{i=1}^n \Delta h_i / h_0) \cdot 100$ – суммарное относительное обжатие, %; σ_{T0} , σ_{T1} – предел текучести лент до и после прокатки; σ_{B1} – предел прочности лент после прокатки; P – значение силы прокатки в начале (1), в середине (2) и в конце (3) длины каждой ленты, а также N – мощность прокатки.

Таблица 7 - Силовые, деформационные и энергосиловые показатели при холодной прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175х300

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

Показано, что применение технологической смазки индустриальное масло И40 на двухвалковом стане 175х300, обеспечило заданную точность лент и уменьшение нагрузок на оборудование. По сравнению с прокатной в сухих валках, применение смазки И40 (5%) позволило в первом проходе уменьшить силу прокатки на 6 кН (8,3%), мощность прокатки на 0,025 кВт (3,34%), а во втором проходе дало возможность уменьшить силу прокатки на 2,96 кН (5,24%), мощность прокатки на 0,017 кВт (3,95%) обеспечив заданную точность толщины по длине ленты на выходе стана. Неравномерность распределения сил прокатки по длине лент при применении смазки И40 уменьшается на 22,7% (в первом проходе) и на 14,64% (во втором походе) по сравнению с прокаткой в сухих валках. Неравномерность распределения относительного обжатия (Δε) по длине лент при применении смазки И40 (5%) уменьшается на 39,15% с 2,35%

до 1,43% (в первом проходе) и на 70,08% с 3,81% до 1,14% (во втором походе). Распределение толщины по длине алюминиевых лент на выходе из стана при смазке валков индустриальным маслом И40 (5%) более равномерно, чем в сухих валках или с водой, а продольная разнотолщинность δh ленты наименьшая и составляет 0,01мм (рис. 12- 14).

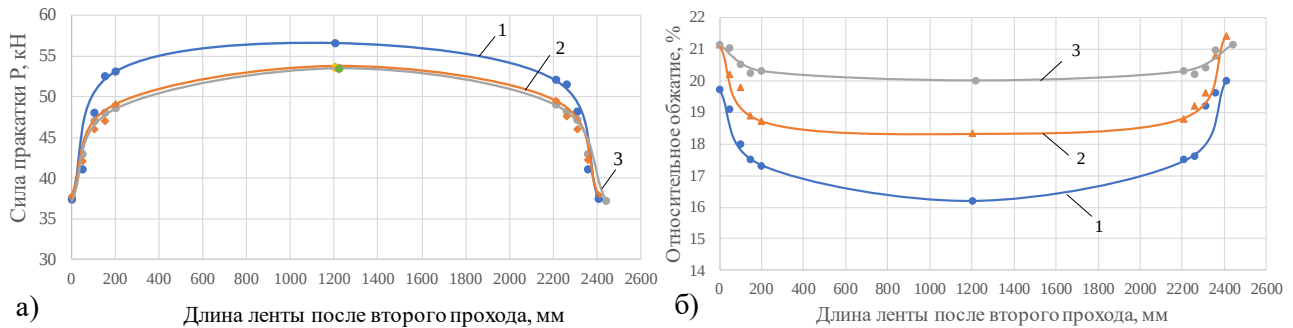


Рисунок 12 – Влияние технологических смазок на распределение силы прокатки (а) и относительных обжатий (б) по длине алюминиевых лент при холодной прокатке во втором проходе на стане 175х300:

1– сухие валки; 2– вода; 3- индустриальное масло И40;

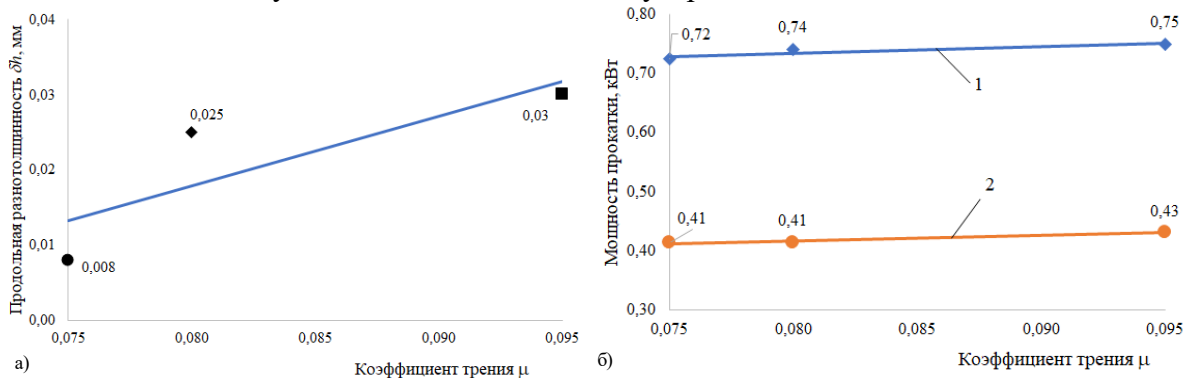


Рисунок 13 – Влияние условий контактного трения на продольную разнотолщинность δh лент после второго прохода (а) и мощность (б) при прокатке лент из алюминиевого сплава АД33 на стане 175х300:

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

б - Мощность прокатки: в первом проходе (1) и во втором проходе (2).

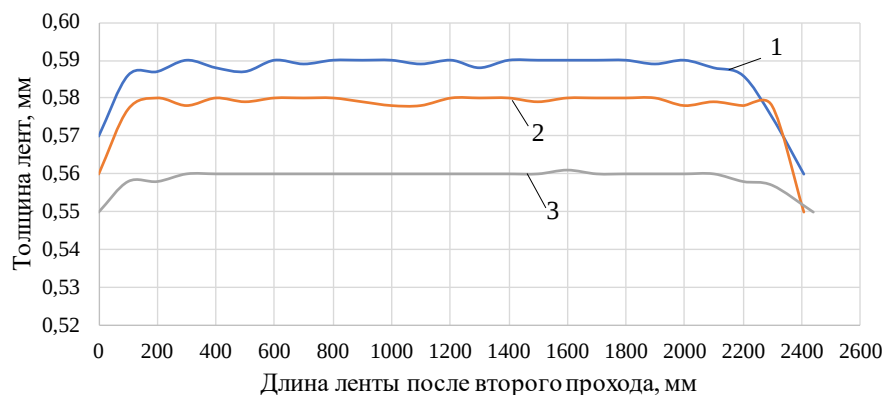


Рисунок 14 - Распределение толщины по длине алюминиевых лент из сплава АД33 после второго прохода при холодной прокатке на стане 175х300 с разными условиями смазывания валков: 1– сухие валки; 2– вода; 3- индустриальное масло И40;

Экспериментально установлено, что применение технологической смазки индустриального масла И40(5%) на промышленном двухвалковом стане 175х300 позволяет уменьшить силу прокатки на 3-6% и увеличить обжатие лент на 2-4%, обеспечив возможность сокращения числа проходов прокатки лент на стане с трех до двух и требуемую точность толщины ленты для листовой штамповки деталей.

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

Разработка и внедрение новых режимов прокатки с применением технологической смазки индустриальное масло И40 на двухвалковом стане 175х300, обеспечили заданную точность толщины 0,55мм по длине лент при значительном сокращении времени на деформацию и снижении расходов (3-4%) на электроэнергию на машиностроительном заводе в г. Донг Най.

Результаты исследований позволили разработать рациональную технологию прокатки алюминиевых лент из сплава АД33 с уменьшением нагрузок на оборудование и потребляемой мощности на прокатку с применением технологической смазки индустриальное масло И40 (5%) на промышленном двухвалковом стане 175х300 машиностроительного завода в г.Донг Най во Вьетнаме.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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

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

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

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

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

6. Усовершенствованы математическая модель и алгоритм расчета среднего давления и силы прокатки, обеспечивающие повышение точности определения параметров холодной прокатки по длине тонких полос и лент. Показано, что применение формулы М.Д Стоуна при расчете коэффициента n_{cp} - напряженного состояния и учет коэффициента n_b влияния внешних частей полосы на очаг деформации позволяют, с математическим ожиданием погрешности 5,0% (АД33) и 5,8% (АМц), повысить точность определения сил в установившийся период (основной) прокатки тонких полос из алюминиевых сплавов. Уточнено уравнение для расчета среднего давления на концевых участках лент с учетом коэффициента контактного трения, что позволит повысить на 1-2% точность определения сил прокатки в нестационарные периоды деформирования.

7. Применение компьютерного моделирования с помощью программы QForm 3D позволило определить не контролируемые параметры по длине раската и спроектировать рациональный деформационный и силовой режим холодной прокатки лент из сплава АД33 на промышленном стане с технологической смазкой И40.

8. Результаты работы были использованы в промышленности и университетах:

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

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

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

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

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**)

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

Shatalov R.L., **Pham V.H.**, Tran V.Q. Determination of the Mechanical Properties of AD33 Aluminum Alloy Strips Using Various Hardness Scales during Cold Rolling. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol 2022. No 13. Pp 1674-1679. (**SCOPUS**)

3. 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 aluminium alloy AD33 with known chemical composition. *Tsvetnye Metally*. 2021. №12. Pp. 70-74. (**SCOPUS**)

4. Шаталов Р.Л, **Фам В.Х**, Чан В.К. Исследование влияния различных технологических смазок на показатели прокатки полос из алюминиевых сплавов. *Металлург*. 2022. № 2. С. 33-38. (**БАК**)

Shatalov R.L, **Pham V.Kh**, Tran V.Q. Investigation of the Effect of Various Production Lubricants on Aluminum Alloy Strip Rolling Characteristics. *Metallurgist*. 2022. № 66. Pp 139-145. (**SCOPUS**).

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

Pham V.H, Shatalov R.L, Chan W.K, Huong X.H. Understanding the efficiency of roll lubrication when rolling AD33 aluminium alloy bands in industrial twin mill 175x300. *Tsvetnye Metally*. 2022. № 8. Pp 78-84. (**SCOPUS**)

6. **Фам В.Х**, Чан В.К. 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)

7. **Фам В.Х**, Чан В.К. Влияние моделей контактного давления на силу прокатки по длине тонких алюминиевых полос АД33 и АМц. Сборник конференции – Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2021». Московский политехнический университет.

2021. С. 204-207. (РИНЦ)

8. **Фам В.Х**, Чан В.К. Влияние смазок и моделей контактного давления на силу прокатки по длине тонких алюминиевых полос. Сборник материалов. Третья международная научно-техническая конференция «ПАВЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». 2021. С. 63-64. (РИНЦ)

9. **Фам В.Х**, Чан В.К. 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)

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

11. **Фам В.Х**, Чан В.К. Исследование механических свойств полос из сплавов цветных металлов при холодной прокатке. Сборник конференции. Труды XIII Конгресса прокатчиков. Том 1. Москва. 2022. С.230-236. (РИНЦ).