

Влияние контактного трения на формирование силы прокатки и ширины по длине полос сплавов цветных металлов*

Комаров Ю.Ю., Омаров А.Ю., Халилова Л.Г.

Российский университет транспорта (МИИТ)

yk5@yandex.ru, asif.omatov@yandex.ru,

leyla-khalilova@yandex.ru

Шаталов Р.Л.

Московский политехнический университет

mmomd@mail.ru

Аннотация. В ходе экспериментального исследования были получены результаты распределения деформационных и силовых показателей на нестационарных участках прокатки тонких полос из меди М0 и алюминиевых сплавов АМц и АД33. В процессе исследования были установлены и уточнены периоды протекания нестационарных процессов по длине тонких полос, а также определены закономерности их протекания. Было изучено влияние смазывания валков на силовые и деформационные показатели прокатки, а также на протяженность нестационарных участков полос.

Особое внимание было уделено возможностям применения лабораторной установки, основанной на двухвалковом прокатном стане размерами 150x235, оборудованной микроконтроллерной системой для высокоточного измерения нагрузок на валки.

Ключевые слова: нестационарные участки полос, контактное трение, смазывание валков, полосы, сила прокатки, деформационные показатели прокатки, прокатный стан 150x235, микроконтроллерная система измерения силы.

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – исследование влияния контактных условий деформирования на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких полос из меди и алюминиевых сплавов.

Задача работы – определить и уточнить влияние контактных условий деформирования на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких полос.

Степень деформации и напряжения, возникающие при прокатке тонких полос, оказывают неодинаковое влияние на формирование усилий прокатки, толщину и ширину по длине и особенно на концевых участках, что требует дополнительных экспериментальных исследований.

Напряжение в металле при переходе из плоского состояния в объемное приводит к неравномерному сжатию полос по длине и образованию разнотолщинности и разноширинности проката [1-2]. Эти неравномерности наиболее заметно проявляются при деформации концевых участков полос. Затухание процесса на начальной стадии прокатки и зарождение, и развитие процесса на заключительной стадии позволяют нам по-новому взглянуть на всю прокатку тонких полос в целом [3]. С увеличением обжатия, которое приводит к увеличению жесткости полосы за счет упрочнения металла, возрастает его влияние на изменение деформационных параметров прокатки и продолжительность нестационарных процессов [4-5].

ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводимые экспериментальные исследования позволяют выявить и уточнить закономерности протекания нестационарных процессов прокатки тонких полос из меди и алюминиевых сплавов.

Многочисленные исследователи описывают устоявшиеся процессы прокатки тонких полос из сплавов цветных металлов. Существует широкий диапазон методов оценки энергосиловых параметров при прокатке полос из цветных металлов и сплавов [6]. Однако на сегодняшний момент они не полностью описывают нестационарные процессы при прокатке тонких полос.

Компенсировать отсутствие адекватных уравнений для расчета изменения механических свойств в зависимости от степени деформации позволит обработка и изучение полученных экспериментальных данных. Необходимо вести работу в данном направлении. Это позволит эффективно проектировать рациональные технологические режимы прокатки лент и полос из цветных металлов на промышленных станах с использованием систем автоматизированного управления.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали влияние обжатия, размеров, механических свойств на распределение силы прокатки, протяженность неустановившихся участков по длине полос из медных и алюминиевых сплавов на двухвалковом прокатном стане 150×235.

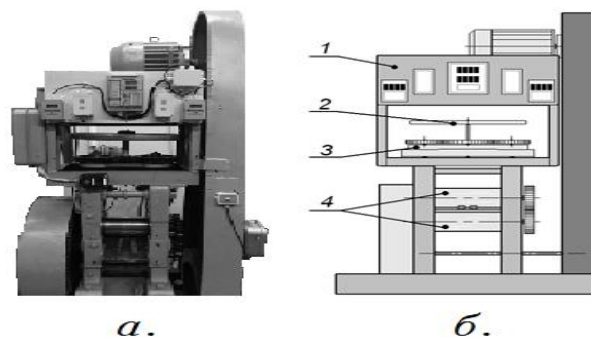


Рис. 1. Лабораторная установка (а) с микропроцессорной компьютеризированной системой контроля усилия прокатки на базе стана 150×235; принципиальная схема установки (б)

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Для проведения экспериментов была применена лабораторная установка, созданная на базе прокатного стана 150×235 с микроконтроллерной системой измерения сил прокатки (рис. 1, а).

Данная установка (рис. 1, б) состоит из микропроцессорной компьютеризированной системы контроля усилия прокатки 1 и стана 150×235, где цифрами обозначены: 2 – система настройки зазора между валками, 3 – блок пьезодатчиков для определения усилия прокатки и 4 – валки стана.

Микропроцессорная компьютеризированная система контроля усилия прокатки [7] на стане 150×235 (рис. 2) открывает широкие возможности для исследования влияние различных воздействий на формирование деформационных и силовых показателей прокатки полос.

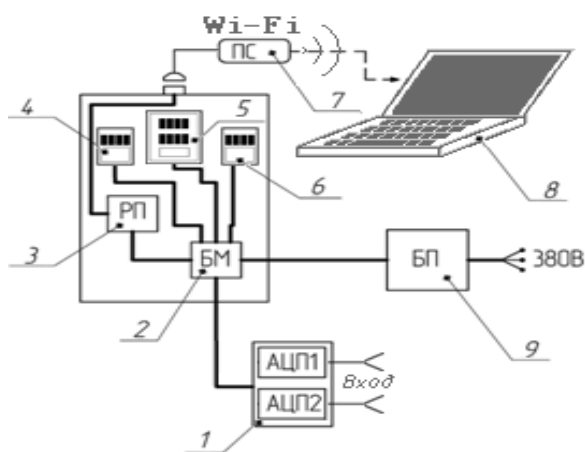


Рис. 2. Функциональная схема микропроцессорной компьютеризированной системы контроля усилия прокатки

Функциональная схема микропроцессорной компьютеризированной системы контроля усилия прокатки представлена на рис. 2. Измерители (блок пьезодатчиков) усилия прокатки (рис. 1, поз. 3) установлены на подушках верхнего валка под левым и правым нажимными винтами прокатного стана. Измерители усилия прокатки осуществляют преобразование сигналов, поступающих с пьезодатчиков. Сигналы усилий поступают в блок АЦП (рис. 2, поз. 1), который обеспечивает преобразование аналоговых сигналов в цифровые. Хранение идентификационной информации, обработка и регистрация оперативной информации (изменение усилия прокатки по времени, т.е. по длине полосы при прокатке) производится микропроцессором (2), соединенным с регистратором параметров (3). Регистратор параметров обеспечивает хранение идентификационной информации и накопление информации долговременного хранения. Сигналы усилий прокатки поступают на цифровые индикаторы (4, 5, 6), на которых в кН отображаются текущее (в процессе прокатки полосы), а затем среднее значение усилий прокатки под левым, правым нажимными винтами и их суммарная величина. Информация с регистратора параметров (3) снимается прибором считывания информации (7). Прибор считывания информации имеет 512 Кб. Эта информация переносится на персональный компьютер (8) через USB порт или передаётся по специальной беспроводной локальной сети Wi-Fi для дальнейшей обработки. Обработка информации и формирование отчета о показателях про-

катки производится с использованием специального разработанного программного обеспечения. Питание системы контроля осуществляется от блока питания БП (9) постоянного тока. Выходное напряжение 25 В, выходной ток 0,5 А, потребляемая мощность не более 5 Вт. БП запитывается, как и двигатель прокатного стана от сети 3-х фазного переменного тока частотой 50Гц и напряжением 380 В.

Данная система позволяет производить измерения усилий по длине полосы с точностью $\pm 0,1$ кН с частотой $1,25 \times 10^{-3}$ с. Она автоматически выделяет максимальную величину усилий, необходимую для оценки допустимого значения [8]. Усредненные и оцененные в достоверности методами математической статистики показатели прокатки позволяют оценить работу системы контроля и точность измерения усилий прокатки [9]. Возникает возможность установить некоторые количественные закономерности влияния условий контактного трения на деформационные и силовые показатели процесса прокатки медных полос. Благодаря высокой точности системы контроля становится возможным исследовать влияние возмущающих и управляющих воздействий, как на установившийся процесс прокатки, так и на нестационарные процессы в периоды захвата и выхода полосы из валков [10].

Для определения и уточнения влияния условий контактного трения на деформационные и силовые показатели прокатки полос из алюминиевых сплавов АМц и АД33 и меди М0 был на описанной выше установке проведён ряд экспериментов, результаты которых представлены в табл. 1-3.

Были прокатаны шесть полос из меди М0 одной партии длиной около $L_0 = 20$ мм, толщиной $h_0 = 3,0$ мм и шириной $b_0 = 25$ мм, и изменяя зазор S между валками (табл. 1). Вначале была прокатана полоса в сухих валках, тщательно обработанных ацетоном, после чего были прокатаны пять полос со смазкой валков керосином.

Таблица 1

Данные прокатки меди М0

Образец №	ϵ , %	P , кН	S , мм	Смазка валков
1	58	87	1,3	сухие
2	42	80	1,3	керосин
3	57	80	1,3	керосин
4	61	83	1,1	керосин
5	63	85	1,1	керосин
6	67	89	1,1	керосин

Дальнейшие экспериментальные исследования включали в себя прокатку семи полос из алюминиевого сплава АМц одной партии длиной около $L_0 = 199$ мм, толщиной $h_0 = 1,9$ мм и шириной $b_0 = 24$ мм, и изменяя зазор S между валками (табл. 2). Эксперимент вначале проводился на первых двух полосах в сухих валках, тщательно обработанных ацетоном, далее были прокатаны ещё пять полос со смазкой валков керосином.

Дальнейшие экспериментальные исследования включали в себя прокатку семи полос из алюминиевого сплава АМц одной партии длиной около $L_0 = 199$ мм, толщиной $h_0 = 1,9$ мм и шириной $b_0 = 24$ мм, и изменяя зазор S между валками (табл. 3).

Таблица 2

Данные прокатки алюминиевого сплава АМц

Образец №	ϵ , %	P, кН	S, мм	Смазка валков
1	51,58	53,91	0,65	сухие
2	17,2	24	1,35	сухие
3	21,58	21,95	1,35	керосин
4	22,11	25,13	1,3	керосин
5	30,53	29,69	1,1	керосин
6	42,63	40,22	0,8	керосин
7	48,42	51,26	0,65	керосин

Таблица 3

Данные прокатки алюминиевого сплава АД33

Образец №	ϵ , %	P, кН	S, мм	Смазка валков
1	59,5	83,81	0,65	сухие
2	57	70,51	0,5	керосин
3	50,5	63,96	0,65	керосин
4	46,5	60,64	0,8	керосин
5	31,5	47,08	1,1	керосин
6	22	35,99	1,35	керосин

Эксперимент вначале проводился на первых двух полосах в сухих валках, тщательно обработанных ацетоном, далее были прокатаны ещё пять полос со смазкой валков керосином.

В дальнейшем были прокатаны шесть полос из алюминиевого сплава АД33 одной партии длиной около $L_0 = 20$ мм, толщиной $h_0 = 2,0$ мм и шириной $b_0 = 25$ мм, и изменяя зазор S между валками (табл. 4). Вначале была прокатана полоса в сухих валках, тщательно обработанных ацетоном, после чего были прокатаны пять полос со смазкой валков керосином.

Механические свойства исследуемых образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства материала исследуемых образцов

Сплав	Предел прочности σ_B , МПа	Предел Течучести σ_T , МПа	Модуль упругости E, МПа
АМц	110	60	$0.70 \cdot 10^5$
АД33	146	70	$0.71 \cdot 10^5$
М0	222	44	$1,30 \cdot 10^5$

Следует также учитывать, что на длину неустановившихся участков также может влиять марка металла и его исходные механические свойства.

МЕТОДЫ, ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

В процессе проведения экспериментов было исследовано влияние обжатия, размеров, механических свойств на распределение усилия прокатки, длину нестационарных участков по длине полос на двухвалковом прокатном стане.

Проведенные экспериментальные исследования для меди М0 проиллюстрированы рис. 3. Данные зависимости относительного обжатия ϵ усилия прокатки P для меди М0 представлены в табл. 1.

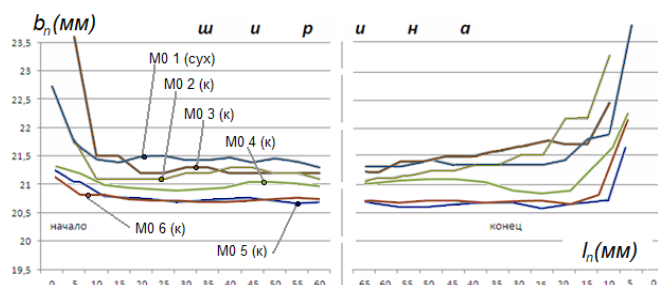


Рис. 3. Изменения ширины полосы из меди М0 на неустановившихся участках по её длине

На рис. 4 представлены результаты первого этапа эксперимента, где показаны изменения ширины полосы алюминиевого сплава АМц на неустановившихся участках. График наглядно демонстрирует, что переход из неустановившегося процесса в установившийся завершается на начальной стадии прокатки в среднем на $L_n = 10-15$ мм по длине полосы.

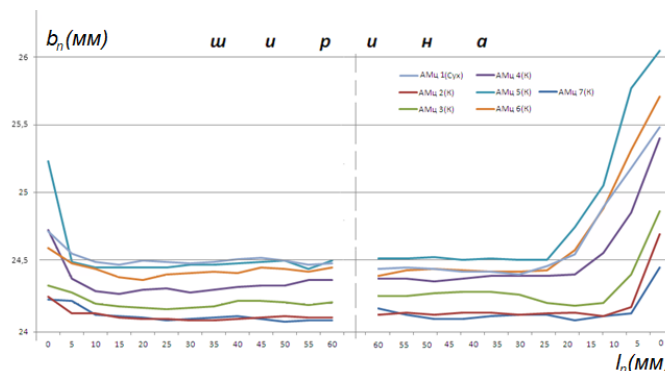


Рис. 4. Изменения ширины полосы алюминиевого сплава АМц на неустановившихся участках по её длине

На конечной стадии переходные процессы начинаются за 30-25 мм до завершения прокатки. Данные зависимости относительного обжатия ϵ усилия прокатки P для алюминиевого сплава АМц приведены в табл. 2.

Результаты второго этапа эксперимента приводятся на рис. 5. Данные зависимости относительного обжатия ϵ усилия прокатки P для алюминиевого сплава АД33 представлены в табл. 3. Представленный на рисунке три график изменения ширины полосы алюминиевого сплава АД33 на неустановившихся участках визуально совпадает с графиком распределения ширины для сплава АМц представленным на рис. 3.

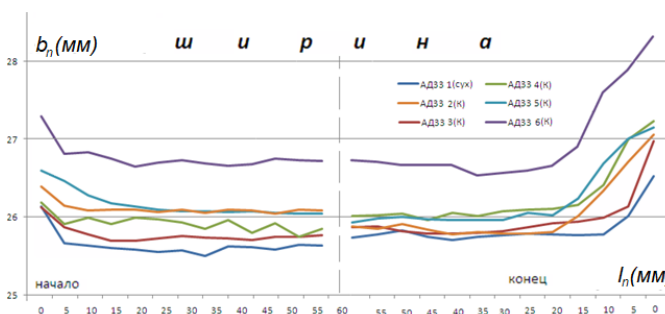


Рис. 5. Изменения ширины полосы алюминиевого сплава АД33 на неустановившихся участках по её длине

Представленный на рис. 3 график изменения ширины полосы меди М0 на неустановившихся участках визуально совпадает с графиками распределения ширины алюминиевых сплавов, представленных на рис. 4 и 5. На графиках наглядно видно, что переход из неустановившегося процесса в установившийся завершается на начальной стадии прокатки в среднем на $L_n = 15-20$ мм по длине полосы. На конечной стадии прокатки переходные процессы начинаются за 30-25 мм до её завершения.

Проведённая серия экспериментов продемонстрировала, что величина зазора S между валками оказывает слабовыраженное воздействие на завершение и начало неустановившихся процессов прокатки полос. Кроме того, из графиков видно, что не значительно влияет и наличие смазки на переходные процессы прокатки, однако делает их более плавными.

Распределение силы прокатки по длине прокатываемых полос, по-видимому, обусловлено условиями деформирования и влиянием внешних частей полосы на очаг деформации. Изменение силы прокатки на нестационарных участках прокатки полос обусловлено изменением напряжённого состояния в процессе деформирования. Так же можно спрогнозировать распределение силы прокатки по длине раската [10].

В силу того, что при прокатке в нестационарных условиях происходит изменение условий деформирования концевых участков полос, напряжённое состояние переходит от плоского к объёмному, что приводит к неравномерному обжатию по длине полос, необходимо уточнение математического описания моделей, которое учитывало бы влияние внешних частей полосы на формирование толщины и ширины проката [11].

Деформационный показатель при листовой прокатке – это физические и математические модели очага деформации (зона воздействия валков на металл).

Для образцов из меди М0 переход из неустановившегося процесса в установившийся завершается на начальной стадии прокатки в среднем на $L_n = 15-20$ мм по длине полосы. На заключительном этапе прокатки переходные процессы начинаются за 30-25 мм до её завершения. Обращает на себя внимание различие в протяженности неустановившихся участков прокатки переднего и заднего концов полос.

Из результатов проведённых экспериментов следует, что при холодной прокатке медных полос (технологическая смазка керосин) с обжатием 65% протяжённость нестационарного формирования ширины полос составляет около 10 мм, а при обжатии 42% она увеличивается до 15 мм, то есть возрастает более чем на 30%.

При холодной прокатке медных полос в сухих валках с обжатием 57% протяжённость нестационарного формирования ширины полос увеличивается до 20 мм, что по сравнению с таким же обжатием при использовании технологической смазки керосин больше на 25%.

Сила прокатки распределяется неравномерно по длине полосы. При прокатке концевых участков сила до установившегося процесса прокатки изменяет своё значение от минимального 12-16 кН и возрастает до 21-50 кН с момента захвата полосы валками. В обратной последовательности уменьшается от установившегося процесса прокатки основной части полосы к концевому участку.

При увеличении обжатия сила прокатки увеличивается почти в 2,5 раза, с 21 кН до 50 кН, при этом длина концевых участков уменьшается с 20 мм до 10 мм. [12].

Для образцов из алюминиевого сплава АМц при холодной прокатке (технологическая смазка керосин) с обжатием 50% протяжённость нестационарного формирования ширины полос составляет около 10 мм, а при обжатии 22% увеличивается до 15 мм, то есть возрастает более чем на 30% [13]. При холодной прокатке алюминиевых полос в сухих валках с обжатием 50% протяжённость нестационарного формирования ширины полос увеличивается до 15 мм, что по сравнению с таким же обжатием при использовании технологической смазки керосин больше на 30%.

Сила прокатки распределяется неравномерно по длине полосы. При прокатке концевых участков сила до установившегося процесса прокатки изменяется от минимального 12-16 кН и возрастает до 22-54 кН с момента захвата полосы валками. В обратной последовательности уменьшается от установившегося процесса прокатки основной части полосы к концевому участку.

При увеличении обжатия сила прокатки увеличивается почти в 2,5 раза, с 22 кН до 51 кН, при этом длина концевых участков уменьшается с 20 мм до 10 мм [14].

При холодной прокатке алюминиевых полос АД33с технологической смазкой керосин с обжатием 42% протяжённость нестационарного формирования ширины полос составляет около 10 мм, а при обжатии 22% увеличивается до 15 мм, то есть возрастает более чем на 50%. В сухих валках с обжатием 52% протяжённость нестационарного формирования ширины полос увеличивается до 20 мм, что по сравнению с таким же обжатием при использовании технологической смазки керосин больше на 30% [15].

Установлено, что сила прокатки неравномерно распределяется по длине полосы [16-17]. При прокатке концевых участков сила до установившегося процесса прокатки изменяется от минимального 12-16 кН и возрастает до 22-58 кН с момента захвата полосы валками.

Сила прокатки при увеличении обжатия увеличивается почти в 2,5 раза, с 22 кН до 58 кН, при этом длина концевых участков уменьшается с 15 мм до 10 мм [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования влияния условий контактного трения на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких полос определены закономерности протекания процессов прокатки по длине тонких полос и установлены периоды протекания нестационарных процессов прокатки по длине тонких медных полос в зависимости от степени деформации и условий контактного трения.

Протекание нестационарных процессов у различных сплавов происходит по сходным или одинаковым законам. На начальном и конечном этапах прокатки эти законы отличаются друг от друга. При прокатке различных сплавов происходит неодинаковое изменение составляющих напряжений и деформаций по длине полосы на участках с нестационарными условиями, что требует дальнейшего исследования.

По результатам проведённой работы следует сделать следующие выводы:

1. Контактные условия деформирования влияют на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких полос.

2. С увеличением обжатия протяженность концевых участков, прокатываемых в течение протекания нестационарного периода деформации, уменьшается.

3. При использовании технологических смазок протяженность концевых участков, прокатываемых в течение протекания нестационарного периода деформации, уменьшается по сравнению с холодной прокаткой в сухих валках.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

4. Целиков А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 318 с.

5. Шаталов Р.Л. Теория процессов прокатки и волочения: учебник для вузов. – М.: ВЗПИ, 1993. – 250 с.

6. Целиков А.И. Основы теории прокатки. – М.: Металлургия, 1965. – 248 с.

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

8. Шаталов Р.Л. Компьютерное моделирование и проектирование процесса непрерывной прокатки полос / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, В.М. Луговой // Сборник докладов междунауч.-техн. конф. «Инновационные технологии обработки металлов давлением». – М.: МИСиС, 2011. – 585 с.

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

10. Шаталов Р.Л. Распределение размеров и сил прокатки по длине латунных и бронзовых полос на двухвалковом стане / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов // Технология металлов. – 2020. – №8. – С. 32-40.

11. Шаталов Р.Л. Распределение размеров и сил прокатки по длине латунных и бронзовых полос на двухвалковом стане / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов // Технология металлов, 2020, №8, с 32-40.

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

13. Чан Ву.К. Исследование эффективности применения смазок валков при холодной прокатке медных лент на промышленном двухвалковом стане 175×300 / Ву.К. Чан, Р.Л. Шаталов, В.Х. Фам, С.Х. Хуинь // Металлург. – 2022. – №6. – С. 48-54.

14. Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, В.М. Белова. – М.: Металлургия, 1974. – 488 с.

15. Chan V.Q. Investigating the Effectiveness of Roll Lubricants in Cold Rolling of Copper Bands in Industrial Two-High Rolling Mill 175 × 300 / V.Q. Chan, R.L. Shatalov, V.H. Pham, X.H. Huynh // Metallurgist. – 2022. – no. 66(5-6). – P. 663-671.

16. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 256 С.

17. Kazeminezhad M. Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flat rolling process / M. Kazeminezhad A. Karimi Taheri // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol.171, is.2. – P. 253-258.

18. Шаталов Р.Л. Определение кривой упрочнения и механических свойств прокатанных полос из оловянисто-фосфорной бронзы (БрОФ6,5-0,15) / Р.Л. Шаталов, М.А. Куликов // Металлург. – 2022. – №12. – С. 69-73.

DOI: 10.24892/RIIE/20240409

The Influence of Contact Friction on the Formation of Rolling Force and width Along the Length of Strips of Non-ferrous Metal Alloys

Komarov Yu.Yu., Omarov A.Yu., Khalilova L.G.

Russian University of Transport (МИТ)

yk5@yandex.ru, asif.omatov@yandex.ru,

leyla-khalilova@yandex.ru

Shatalov R.L.

Moscow Polytechnic University

mmomd@mail.ru

Abstract. During the experimental study, the results of the distribution of deformation and force indicators in non-stationary sections of rolling of thin strips of copper M0 and aluminum alloys AMts and AD33 were obtained. The periods of non-stationary processes along the length of thin strips were established and specified, and the patterns of their occurrence were determined. The effect of roll lubrication on the force and deformation indicators of rolling, as well as on the length of non-stationary sections of strips, was studied. Particular attention was

paid to the possibilities of using a laboratory setup based on a two-high rolling mill measuring 150x235, equipped with a micro-controller system for high-precision measurement of roll loads.

Keywords: non-stationary sections of strips, contact friction, lubrication of rolls, strips, rolling force, rolling deformation indicators, rolling mill 150x235, micro-controller force measurement system.