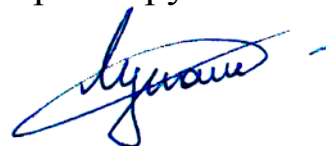


УДК 621.771:669.35-122.3

На правах рукописи



Лукаш Алексей Сергеевич

**Усовершенствование технологического
процесса и математической модели холодной
прокатки тонких полос из меди и латуней для
улучшения их качества**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва-2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»

- Научный руководитель – **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Машины и технологии обработки металлов
давлением» ФГБОУ ВО «Московский
государственный машиностроительный
университет (МАМИ)»/Университет
машиностроения/
- Официальные оппоненты: – **Колесников Александр Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Оборудование и технологии прокатки»
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»
- **Ионов Сергей Михайлович**
кандидат технических наук, доцент, профессор
кафедры «Обработки металлов давлением»
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет "МИСиС"»
- Ведущая организация – Научно-исследовательский, проектный и
конструкторский институт сплавов и обработки
цветных металлов
ОАО «Институт Цветметобработка»

Защита диссертации состоится 2 ноября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук по адресу: г. Москва, Ленинский пр. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>. Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334 г. Москва, Ленинский проспект 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Калашников И. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Возрастающие требования к качеству листового проката и, в частности, к точности его размеров, требуют усовершенствования технологии прокатки, компьютеризированных систем проектирования показателей процесса и новых конструкций деформирующих агрегатов.

Анализ известных технологий, конструкций деформирующих агрегатов и моделей расчета показал, что они не всегда обеспечивают необходимую точность листовой продукции. Для ряда цветных металлов и сплавов, прокатываемых на промышленных предприятиях, не составлены уравнения по определению величины сопротивления металла деформации неразрушающим методом.

Поэтому разработка режимов прокатки, обеспечивающих повышение точности листов, с использованием математической модели, учитывающей реальные значения сопротивления металла деформации и условия деформирования, разработка новых устройств, обеспечивающих дополнительную калибровку полос, являются весьма актуальными.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является усовершенствование технологических режимов прокатки тонких полос и листов из меди и латуней для улучшения их качества.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие задачи:

- создание лабораторного программно-технического комплекса для исследования процесса прокатки меди и латуней;
- установление статистической зависимости между величиной сопротивления металла деформации и твердостью;
- нахождение зависимостей сопротивления деформации конкретных металлов от величины обжатия;
- исследование силовых параметров на действующем прокатном стане и определение возможных колебаний усилий прокатки;

— исследование влияния контактного трения на усилия прокатки металлов и сплавов конкретного химического состава;

— разработка программной системы расчета и проектирования технологии листовой прокатки, исследование работоспособности созданной математической модели на основе режимов прокатки промышленных прокатных станов;

— исследование формирования плоскостности и определение критических напряжений при прокатке;

— разработка конструкции нового калибровочного агрегата для повышения точности тонких листов.

Объект исследования.

Холодная прокатка медных и латунных полос на одноклетьевых и непрерывных станах.

Методы исследования.

Теоретический анализ проведен на основании использования методов современной теории пластичности. Экспериментальные исследования проведены с применением современной тензометрической аппаратуры и статистической обработки информации. Результаты исследований, теоретических разработок и математического моделирования подвергались анализу и сравнению с результатами лабораторных и промышленных экспериментов.

Научная новизна работы:

1. Разработан экспериментально-аналитический метод определения сопротивления металла деформации в клети при неизвестной исходной толщине ненаклепанного металла, позволяющий проектировать режимы листовой прокатки в реальных условиях частичной неопределенности входных переменных. Получены уравнения расчета сопротивления деформации меди МЗ и латуни Л63 и ЛС59-1 конкретного химического состава, позволяющие исследовать и проектировать режимы листовой прокатки на действующих промышленных агрегатах.

2. Уточнены уравнения расчета критических напряжений сжатия и показателей плоскостности полосы с учетом упругопластической деформации

металла, позволяющие повысить точность определения показателей неплоскостности.

3. Усовершенствована математическая модель пластической деформации металла в клети и, созданная на её основе, программная система, позволяющая в диалоговом режиме исследовать и проектировать показатели холодной листовой прокатки на одноклетевых и непрерывных станах.

4. Получены регрессионные уравнения, связывающие величины сопротивления деформации меди и латуней с показателями твердости, позволяющие расширить области применения методов неразрушающего контроля механических свойств проката.

5. Уточнены закономерности влияния условий контактного трения на точность определения силовых показателей и профиля полосы при листовой прокатке меди и латуней.

Достоверность результатов работы.

Достоверность результатов подтверждается промышленными испытаниями, проводимыми на сертифицированном оборудовании, с использованием современных методов и технических средств, обеспечивающих высокую точность измерений, лицензированных программ статистической обработки данных, применением обоснованных методов математической обработки результатов экспериментов, применением уточненной методики расчета основных силовых параметров. Теоретический анализ построен на основании использования методов теории пластичности.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Результаты работы внедрены на предприятиях ООО «Кольчугинский завод по обработке цветных металлов» и ООО «Кольчугцветметобработка», что позволило за счет изменения режимов натяжений и корректировки исходной выпуклости рабочих валков уменьшить поперечную разнотолщинность и улучшить плоскостность медных и латунных лент на 2-4%.

2. Разработанный программно-технический комплекс на базе двухвалкового листового прокатного стана 150x235 мм используется в учебном процессе Университета машиностроения.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы были доложены, обсуждены и одобрены на научных конференциях и семинарах: Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию П. И. Полухина (Москва, 2011); VI Московской научно-практической конференции «Студенческая наука» (Москва, 2011); Международной конференции «Технологии и оборудование для прокатного производства» (Москва, 2012); Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии» (Москва, 2015); Международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2015).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы, включающего 108 наименований. Диссертация изложена на 132 страницах, содержит 32 рисунков и 13 таблиц.

Приложения составляют 3 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты их научная новизна и практическая значимость, приведена структура диссертации.

В первой главе изложен аналитический обзор научно-технических работ в области теории и технологии листовой прокатки металлов по теме и задачам диссертации.

Проанализированы современные тенденции развития прокатного производства и конструкций рабочих клеток для прокатки листов и лент из цветных металлов. Исследованы основные методы, технологии и системы автоматизированного проектирования, обеспечивающие повышение качества проката.

Рассмотрены причины потери устойчивости в процессе деформации. На основании изученных работ показано, что в настоящее время основной проблемой листовой прокатки является не увеличение производительности и скорости прокатки, а повышение качества проката. Очень важной проблемой является необходимость повышения точности размеров проката, за счет уменьшения поперечной и продольной разнотолщинности полос.

Приведены методы определения напряжений и деформаций при пластической деформации металла, основанные на разработках теории пластичности в трудах советских, российских и зарубежных ученых.

Неравномерность деформации по ширине полосы создает систему напряжений растяжения и сжатия, при этом в тех слоях, где действуют напряжения сжатия, возможна потеря устойчивости и образование волн, что приводит к образованию дефектов полосы. Процесс потери устойчивости изучен недостаточно и при его анализе используют формулы теории упругости, применимые только в области упругих деформаций.

На основании современной теории пластичности процесс прокатки изучен Т. Карманом, И. М. Павловым, А. И. Целиковым, П. И. Полухиным, Р. Хиллом и другими учеными.

Ряд важных исследований по процессам прокатки проведен в последние годы российскими учеными Г. В. Ашихминым, А. А. Богатовым, М. Я. Бровманом, А. М. Галкиным, Э. А. Гарбером, А. В. Зиновьевым, А. Г. Колесниковым, Л. С. Коханом, Г. С. Никитиным, В. П. Полухиным, А. И. Трайно и другими.

Очень мало изучена связь между величинами сопротивления деформации меди и латуней и параметрами, которые легко контролировать, например, твердость металла.

Системы автоматизированного проектирования процессов ОМД широко применяются в университетах, научно-исследовательских организациях и на производстве. Анализ показывает, что одни из них являются узкоспециализированными программными продуктами, а другие, ориентированные на решение широкого спектра задач, являются весьма

сложными для освоения и применения. Существует потребность в создании универсальной автоматизированной системы проектирования процесса прокатки полос, обеспечивающей возможность имитировать процесс прокатки для разных типов станов, с возможностью выбора металла конкретной марки, позволяющей рассчитывать силовые, геометрические и механические характеристики получаемой продукции на каждом этапе работы программы.

Вторая глава посвящена исследованию прокатки меди и латуни конкретного химического состава на модернизированном лабораторном стане, усовершенствованию методов определения механических свойств наклепанного металла, а также математическому обеспечению разработанной системы проектирования технологических процессов деформирования цветных металлов и сплавов.

Проведена модернизация двухвалкового листового стана 150x235 в лаборатории кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына», «Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)». Стан был модернизирован в два этапа.

На первом этапе, при технической помощи Московского завода по обработке цветных металлов, проведен ремонт и модернизация валкового узла, рабочие валки были переточены и отшлифованы.

На втором этапе, разработано технологическое задание и, при участии ЗАО ИТЦ «КРОСС», выполнен проект оснащения стана микропроцессорной системой контроля усилия прокатки под левым и правым нажимным винтами.

Микропроцессорная система контроля усилия прокатки на стане 150×235 позволяет изучать влияние различных возмущающих и управляющих воздействий на формирование деформационных и силовых показателей прокатки полос, контролировать усилие прокатки с точностью до 0,1 кН с частотой 0,1 с. по длине прокатываемой полосы. Функциональная схема этой системы приведена на рис. 1.

На рисунке 1 обозначены: 1 – станина стана; 2 – валки; 3 – нажимной механизм; 4 – прокатываемая полоса; 5, 6 – датчики усилия прокатки под правым и левым нажимными винтами; 7 – блок питания; 8 – блоки АЦП; 9 –

микропроцессор; 10, 11 – цифровые индикаторы усилий прокатки под левым и правым нажимными винтами; 12 – цифровой индикатор суммарного усилия прокатки; 13 – регистратор параметров; 14 – прибор считывания информации; 15 – персональный компьютер.

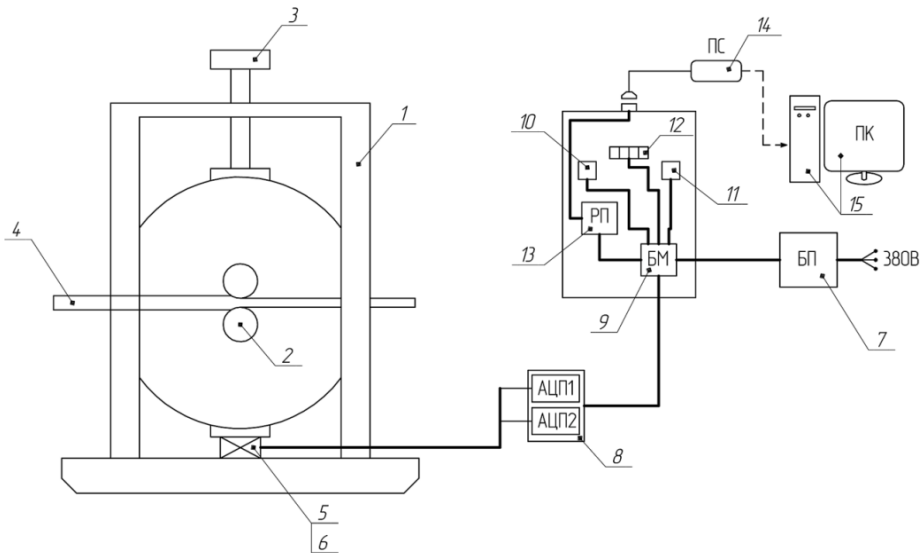


Рис. 1 - Функциональная схема микропроцессорной системы контроля усилия прокатки на лабораторном двухвалковом стане 150x235.

На созданном программно-техническом комплексе проведено экспериментальное исследование процесса холодной прокатки меди и латуней. В качестве заготовок под экспериментальную прокатку использовали образцы толщиной 2,0-2,75 мм, шириной 20 мм, длиной 150 мм из промышленных партий меди и латуней, прокатанных на Кольчугинских и Кировском заводах ОЦМ.

Образцы по 3-4 штуки прокатывали с разной степенью обжатия в диапазоне от 4 до 26%. До и после прокатки измеряли геометрические характеристики образцов, также записывали усилия прокатки, рассчитанные электронным измерителем на стане.

На Московском заводе обработки цветных металлов из прокатанного металла были вырезаны образцы, необходимой формы по ГОСТ 1497-84, для проведения испытаний на растяжение. Опытные образцы были испытаны на прочность и пластичность на универсальной разрывной машине 1958У-10. Измерение твердости проводилось на твердомерах со стальным шариком -

наконечником по шкале Роквелла, а полученные результаты затем были переведены в единицы твердости по Бринеллю.

При холодной прокатке металлов и сплавов величина сопротивления металла деформации σ_s зависит от величины суммарного относительного обжатия полосы от отожженного (начального) до рассматриваемого состояния и условий деформирования металла. Большой объем экспериментальных исследований показывает, что величину σ_s можно записать в виде функции

$$\sigma_s = A + B\varepsilon^D, \quad (1)$$

где коэффициенты A, B, D характеризуют упрочнение данного металла или сплава и определяются экспериментально, а ε – величина относительной деформации, %.

В ходе исследований указанные коэффициенты были определены для меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1 конкретного химического состава. Их величины приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты A, B, D для расчета по уравнению (1) сопротивления деформации σ_s (МПа) для меди и латуней при холодной прокатке, а также коэффициент достоверности аппроксимации R^2 .

| Марка металла | A | B | D | R^2 |
|---------------|-----|-------|------|-------|
| МЗ | 77 | 54,3 | 0,42 | 0,981 |
| Л63 | 159 | 39,6 | 0,56 | 0,982 |
| ЛС59-1 | 192 | 118,6 | 0,13 | 0,897 |

Результаты экспериментального исследования позволили установить зависимости сопротивления металла деформации σ_s от твердости HB для прокатанных образцов из меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1. После обработки экспериментальных данных методом математической статистики получены уравнения (в приближенном виде линейной зависимости) для меди МЗ – уравнение (2), латуни ЛС59-1 – уравнение (3) и латуни Л63 – уравнение (4):

$$\sigma_s = 2,609 \cdot HB + 31,73, \quad (R^2 = 0,884), \quad (2)$$

$$\sigma_s = 2,572 \cdot HB + 39,33, \quad (R^2 = 0,696), \quad (3)$$

$$\sigma_s = 1,355 \cdot HB + 197,01, \quad (R^2 = 0,880), \quad (4)$$

где HB – твердость по Бринеллю, в МПа.

На базе общепринятой модели Т. Кармана, позднее доработанной А. И. Целиковым, создан программный продукт, позволяющий рассчитывать и моделировать процесс листовой прокатки. Входными параметрами являются 20 вводимых величин, характеризующих параметры стана и полосы. Результатом работы программы является расчет более 40 характеристик, описывающих процесс холодной прокатки, а также графики эпюр напряжений. На рис. 2 показан интерфейс программы с построенными графиками напряжений.

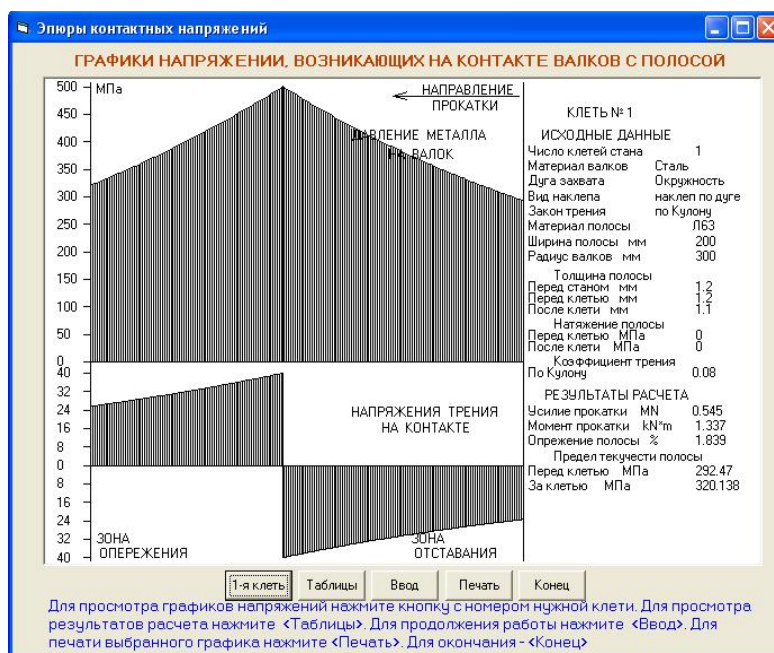


Рис.2 – Результат построения эпюр контактных напряжений при листовой прокатке по разработанной математической модели.

В третьей главе исследовано влияние законов и условий контактного трения на точность определения силовых показателей и профиля полосы при листовой прокатке меди и латуней, а также представлена методика расчета критических напряжений и показателей формы полосы с учетом упругопластического изгиба по толщине при прокатке.

На лабораторном двухвалковом стане 150x235 провели экспериментальное исследование процесса прокатки меди М3 и латуни Л63 с целью установления количественных закономерностей влияния различных смазок на деформационные и силовые показатели прокатки тонких полос, а также оценке точности расчета этих параметров на разработанной программной системе.

Эксперимент проводили на образцах промышленных партий металлов, полученных с Кировского и Кольчугинского заводов ОЦМ. Образцы прокатывали на стане 150x235, последовательно меняя условия трения в валках. Прокатку осуществляли в сухих валках, затем со смазкой в виде эмульсии 5% (СП-3), и в заключение – керосина (КО-25). Коэффициенты контактного трения f_{mp} для каждого варианта прокатки определяли по уравнению А. П. Грудева.

Результаты исследования представлены в таблице 2, в которой приняты следующие обозначения: f_{mp} – коэффициент контактного трения; h_0, h_1 – толщина полос до и после прокатки; b_0, b_1 – ширина полос до и после прокатки; ε – относительное обжатие; l/h_{cp} – фактор формы очага деформации; P_{cp} – среднее значение усилия прокатки по длине полосы в установившийся период; $P_{расч}$ – расчетное усилие прокатки; ΔP – погрешность между экспериментально полученным и рассчитанным усилием прокатки.

Таблица 2

Влияние смазки на деформационные и силовые показатели прокатки медных и латунных полос на двухвалковом стане 150x235.

| марка металла | смазка, f_{mp} | h_0 , мм | h_1 , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | ε , % | l/h_{cp} | P_{cp} , кН | $P_{расч}$, кН | ΔP , % |
|---------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|------------|---------------|-----------------|----------------|
| МЗ | без смазки, 0,104 | 1,9 | 1,26 | 20,1 | 20,6 | 33,68 | 4,38 | 55,38 | 48,26 | 12,86 |
| МЗ | эмульсия, 0,087 | 1,9 | 1,24 | 20,0 | 20,5 | 34,74 | 4,47 | 50,67 | 45,21 | 10,78 |
| МЗ | керосин, 0,067 | 1,9 | 1,22 | 19,0 | 20,0 | 35,63 | 4,54 | 43,89 | 40,68 | 7,31 |
| Л63 | без смазки, 0,104 | 2,6 | 2,02 | 20,0 | 21,0 | 22,19 | 2,88 | 53,50 | 52,14 | 2,54 |
| Л63 | эмульсия, 0,087 | 2,6 | 1,97 | 20,1 | 21,2 | 24,35 | 3,04 | 54,35 | 52,02 | 4,29 |
| Л63 | керосин, 0,067 | 2,6 | 1,96 | 20,1 | 21,2 | 24,50 | 3,05 | 52,03 | 51,11 | 1,77 |

Результаты эксперимента позволили установить количественное влияние условий контактного трения на деформационные и силовые показатели холодной прокатки промышленных партий полос.

По результатам лабораторного эксперимента, на рис. 3 показано влияние коэффициента трения на степень деформации при прокатке опытных полос в фиксированных исходных зазорах ненагруженных валков. Улучшенные условия контактного трения позволяют увеличить обжатие металла и уменьшить толщину полосы на выходе из стана без изменения зазора между валками. Так, при прокатке полос из латуни Л63 в сухих валках $\varepsilon=22,2\%$, $h_1=2,02$ мм, а при смазке валков керосином относительное обжатие увеличилось до $\varepsilon=24,5\%$, а толщина уменьшилась до $h_1=1,96$ мм.

На основе полученных данных установлено, что применение смазок при прокатке медных и латунных (Л63) полос увеличивает степень деформации на 2,0-2,5% и уменьшает толщину металла на выходе из стана примерно на 3%. Поэтому изменение условий контактного трения необходимо учитывать при настройке стана на прокатку полос заданной толщины.

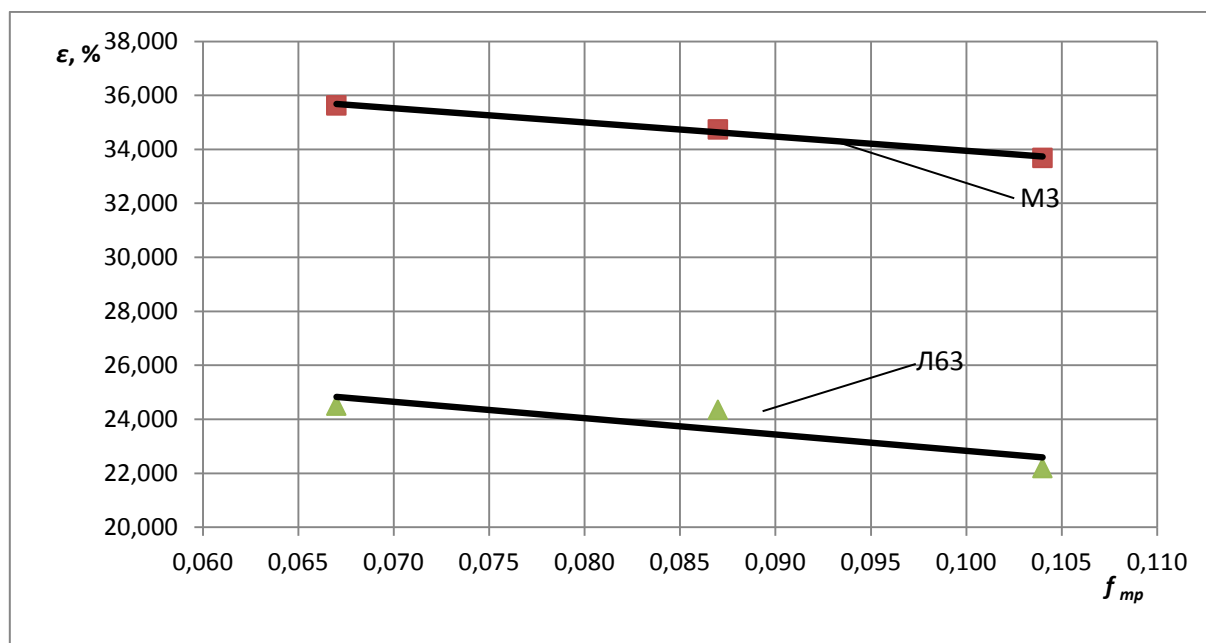


Рис.3 – Влияние коэффициента контактного трения соответствующих опытным смазкам на степень деформации на стане 150x235 при деформации полос из меди М3 и латуни Л63.

Из-за неравномерности обжатия по ширине полосы возможна потеря устойчивости проката и образование волнистости. Обычно потерю продольной устойчивости проката оценивают по величине критического напряжения сжатия $\sigma_{кр}$ и определяют по формуле С. П. Тимошенко

$$\sigma_{кр} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2, \quad (5)$$

где h – толщина, b – ширина деформируемого листа, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, k – безразмерный параметр, определяемый видом закрепления полосы по ее контуру.

Анализ дефектов формы полосы, характеризуемых показателем a/L (a , L – амплитуда и длина периода волны), и соответствующих изменений относительной продольной деформации по ширине металла $e = \Delta L/L$, прокатываемых на промышленных станах, показал, что формирование продольных напряжений σ происходит как в упругой ($e \leq 0,002$), так и в пластической ($e > 0,002$) области. Показано, что если на некотором участке прокатываемого листа возникнет «волна» с амплитудой « a » и длиной волны « L », то критическое напряжение при упругопластическом изгибе, из условия равенства работ определяется по формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{K\pi^2 E_0}{L^2} \left(\frac{h}{K_1 L}\right)^2, \quad (6)$$

где $K = 1 - 2$ в зависимости от вида неплоскостности (волна, короб), $K_1 = 0,2 - 0,5$ в зависимости от ширины участка неплоскостности. Зависимость (6) применима при $\sigma_{кр} \leq \sigma_s$.

При анализе формоизменения для случая упругопластического изгиба по толщине полосы в уравнении (6) вместо E необходимо использовать E_0 – модуль упругопластического продольного изгиба:

$$E_0 = 4EE_s(\sqrt{E} + \sqrt{E_s})^{-2}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости, а E_s – модуль упругости металла на кривой текучести.

Для расчета показателя неплоскостности a/L полосы в упругопластической области получена формула

$$\frac{a}{L} = \frac{2}{k\pi} \sqrt{\left| \left(\frac{\pi h}{\sqrt{12}L} \sqrt{\frac{E_0}{\sigma_{кр}}} - 1 \right) \right|}. \quad (8)$$

Опытная холодная прокатка полос из меди МЗ проводилась на реверсивном четырехвалковом стане 150/500x400 ООО «Кольчугцветметобработка». Расчеты критических напряжений сжатия проводили по формуле (6), а показателя формы a/L по зависимости (8). Параметры плоскостности прокатываемых полос измеряли в соответствии с ГОСТ 1173-2006. Для этого вырезанный из прокатанной полосы лист укладывали на плоскую поверхность контрольного стола, где мерительным инструментом с точностью $\pm 0,1$ мм измеряли максимальное отклонение его от плоскости стола (амплитуда – a), а также расстояние между точками прилегания его к плоскости стола (длина периода волны – L). Для сортамента полос, прокатываемых на стане, статистическая обработка параметров плоскостности показала, что амплитуда волнистости находится в интервале 0-20 мм, длина периода – 400-600 мм. Результаты измерений и расчеты соответствующих показателей прокатки представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатель формы и критические напряжения для режима обжатий полос шириной 340 мм из медиМЗ на реверсивном четырехвалковом стане 150/500x400.

| Проход № | h_0 , мм | h_1 , мм | T_0 , кН | T_1 , кН | P , кН | a , мм | L , мм | a/L | $e = \Delta L/L$ | $\sigma_{кр}$, МПа | Форма полосы/ деформация |
|----------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|-------|------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 | 1,5 | 1,2 | 60 | 60 | 388 | | | | | | планшетная |
| 2 | 1,2 | 0,8 | 60 | 50 | 455 | | | | | | планшетная |
| 3 | 0,8 | 0,65 | 50 | 40 | 341 | 9 | 600 | 0,015 | 0,0006 | 3,028 | волнистая/ упругая |
| 4 | 0,65 | 0,45 | 40 | 30 | 442 | 11 | 500 | 0,022 | 0,0012 | 2,090 | волнистая/ упругая |
| 5 | 0,45 | 0,35 | 30 | 30 | 352 | 15 | 400 | 0,038 | 0,0035 | 1,975 | волнистая/ пластическая |

Расчеты критических напряжений сжатия по представленной методике (6) показали, что с третьего по пятый проходы они находятся на уровне 2-3МПа. Использование полученных зависимостей позволит повысить точность настройки

листовых станов и регулирования плоскостности полос в процессе прокатки, а также обосновано проводить корректировку режимов обжатий.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментов на непрерывном трехклетьевом полосовом стане 1000 Кировского завода по обработке цветных металлов и математического моделирования режимов прокатки тонких медных и латунных полос.

Математическое моделирование проводили применительно к прокатке тонких полос из меди и латуни на непрерывном трехклетьевом стане 1000 с размерами валков в клетки 375/1000x1000 мм Кировского завода по обработке цветных металлов (ОАО КЗОЦМ). Стан обеспечивает холодную прокатку полос толщиной до 0,4 и шириной до 800 мм из подката толщиной до 15 мм со скоростью до 5 м/с.

С помощью разработанной системы проектирования технологических процессов деформирования были рассчитаны режимы прокатки на указанном стане тонких полос из латуни Л63 из подката толщиной 9,4 мм, шириной 630-710 мм.

Исследовали влияние условий контактного трения (f_{mp}) с применением двух видов смазок и использованием двух закономерностей распределения касательных напряжений трения по длине зоны деформации (Амонтона-Кулона и Зибеля) на деформационные и силовые показатели по клетям непрерывного стана 1000 при прокатке полос толщиной 2,7 мм, шириной 630 мм из латуни Л63. Коэффициенты контактного трения f_{mp} определяли по формуле А. П. Грудева.

Тип смазки рабочих валков влияет на деформационные и силовые показатели прокатки. Изменение типа смазки при подаче в зону деформации уменьшает коэффициент контактного трения приблизительно с 0,069 (эмульсия 5%) до 0,061 (эмульсия 10%).

Измерения толщины по ширине с шагом 50,0 мм проводили на концевых (задних) участках полосы на расстоянии 4 метра. При исследовании поперечной разнотолщинности в качестве оценки ее симметричной составляющей принимали стрелу параболы $\delta h_{экс}$, полученную при обработке измеренных толщин по ширине полосы методом наименьших квадратов. Среднее квадратичное отклонение δh ,

при аппроксимации поперечного профиля полосы квадратичной параболой, полученных замеров в смежных сечениях находилось в пределах $(1-2) \cdot 10^{-4}$ мм при среднем уровне порядка 0,045 мм, что говорит о достаточной стабильности принятой характеристики. При прокатке одного и того же типоразмера в пределах одной партии среднее значение поперечной разнотолщинности увеличивается из-за износа рабочих валков, что требует корректировки в настройки стана.

Таблица 4

Деформационные и силовые показатели прокатки полос толщиной 2,7 мм, шириной 630 мм из латуни Л63 на непрерывном трехклетевом стане 1000 КЗОЦМ в зависимости от условий и законов распределения контактного трения.

| № клетки | h_0 , мм | h_1 , мм | ε , % | T_0/T_1 кН | Вид смазки, $f_{тр}$ | Закон трения | $P_{экс}$, кН | $P_{расч}$, кН | ΔP , % | $\delta h_{экс}$, мм | $\delta h_{расч}$, мм | $\Delta \delta h$, % |
|----------|------------|------------|-------------------|--------------|------------------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 9,4 | 6,0 | 36,17 | 15/80 | Эмульсия 5%, 0,069 | А-К | 5413 | 6139 | 13,41 | - | 0,041 | - |
| | | | | | | 3 | | 6213 | 14,78 | | 0,045 | - |
| | | | | | Эмульсия 10%, 0,065 | А-К | 5203 | 6059 | 16,45 | - | 0,037 | - |
| | | | | | | 3 | | 6143 | 18,07 | | 0,041 | - |
| 2 | 6,0 | 4,0 | 33,33 | 80/80 | Эмульсия 5%, 0,067 | А-К | 6506 | 6944 | 6,74 | - | 0,075 | - |
| | | | | | | 3 | | 7035 | 8,14 | | 0,08 | - |
| | | | | | Эмульсия 10%, 0,063 | А-К | 6271 | 6815 | 8,67 | - | 0,068 | - |
| | | | | | | 3 | | 6944 | 10,73 | | 0,075 | - |
| 3 | 4,0 | 2,7 | 32,50 | 80/80 | Эмульсия 5%, 0,065 | А-К | 6804 | 7443 | 9,39 | 0,055 | 0,061 | 11,2 |
| | | | | | | 3 | | 7509 | 10,36 | | 0,062 | 13,02 |
| | | | | | Эмульсия 10%, 0,061 | А-К | 6520 | 7252 | 11,23 | 0,049 | 0,056 | 14 |
| | | | | | | 3 | | 7399 | 13,48 | | 0,058 | 18,07 |

В табл. 4 обозначено: А-К и 3 – законы трения по Амонтону-Кулону и Зибелю соответственно.

Результаты исследований, представленные в таблице 4, показали, что применение закона трения по Амонтону-Кулону позволяет повысить точность определения усилий прокатки и разнотолщинности полосы. Анализ результатов эксперимента позволил рекомендовать на непрерывном стане 1000

скорректировать деформационный режим в сторону увеличения обжатия во 2-й и соответствующего уменьшения в последней 3-й клетки и увеличить профилировку верхних рабочих валков до +0,07 мм, что позволит уменьшить поперечную разнотолщинность полос до 0,01-0,02 мм для соответствия требованиям европейских стандартов, предъявляемых к качеству листового проката.

Исследовали (экспериментально и с помощью математической модели) режимы прокатки медных и латунных полос на листовом двухвалковом стане 350x450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов» и реверсивном листовом четырехвалковом прокатном стане 150/500x400 завода «Кольчугцветметобработка».

Для реверсивного листового четырехвалкового прокатного стана расчеты показали, что увеличение выпуклости валков до +0,015 мм позволяет снизить разнотолщинность на 10-16%. А увеличение переднего и заднего натяжения с 20 кН до 27 кН позволяет снизить поперечную разнотолщинность в среднем на 11%. Внедрение разработанных режимов прокатки и профилировки рабочих валков позволит улучшить на 3-4% качество по точности медных полос на стане 150/500x400 завода «Кольчугцветметобработка» и получить экономический эффект в размере 1,2 млн. руб. в год.

Корректировка профиля рабочих валков листового двухвалкового прокатного стана 350x450 «Кольчугинского завода по обработке цветных металлов» до величины +0,09 мм и увеличение натяжений между станом и моталкой на 20% позволит уменьшить разнотолщинность и улучшить плоскостность лент на 2-3%, и получить экономический эффект в размере 800 тыс. руб. в год.

В пятой главе разработаны и исследованы инновационные технологические и технические решения, обеспечивающие повышение точности прокатных полос за счет внестановой калибровки листового металла.

На основе проведенных исследований по калибровке узких полос из меди МЗ, разработана новая конструкция калибрующего блока для регулирования плоскостности, обеспечивающая дополнительное улучшение качества прокатанных тонких полос. Схема калибрующего блока представлена на рис. 4.

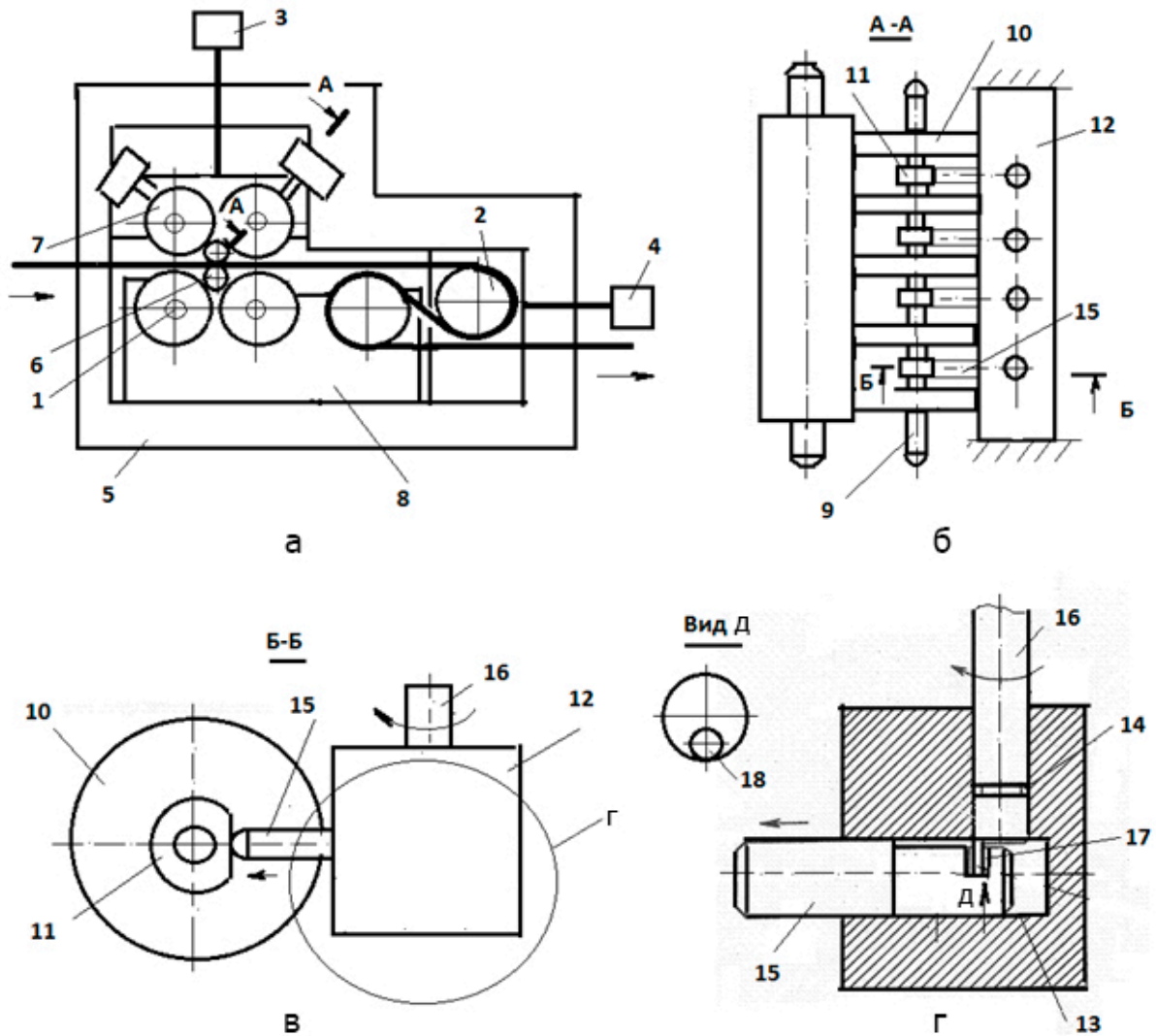


Рис.4 – Схема калибрующего блока для регулирования плоскостности полосы: а – общий вид блока, б – разрез А-А, в – разрез Б-Б, г – разрез Г.

Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы, содержит две последовательно расположенные группы валков 1 и 2, каждая из которых снабжена своим нажимным устройством 3 и 4. Первая группа валков выполнена неприводной, и обе группы валков установлены в общей клетке 5. Каждый рабочий валок 6 снабжен двумя опорными 7, два из которых относятся к одному рабочему валку, установлены в одной общей подушке 8 с ближайшим из валков второй группы. Два верхних опорных валка выполнены в виде насаженных на ось 9 ряда роликов 10, контактирующих с верхним рабочим валком, ролики расположены в промежутках между смежными опорами 11. На продольной части опорного моста 12 выполнены горизонтальные отверстия 13, соединяющиеся с перпендикулярными им вертикальными отверстиями 14, при этом в

горизонтальных отверстиях установлены толкатели 15, а в вертикальных отверстиях - поворотные оси 16. На каждом толкателе со стороны парной ему оси имеется паз 17, на обращенной к толкателю части оси эксцентрично насажена втулка 18, размещенная в пазу.

Если полоса имеет дефект в виде волнистости по краям, то необходимо изменить форму межвалкового зазора на двояковыпуклый, чтобы полоса получала большее обжатие по середине и становилась плоской. Для этого производится поворот осей 16 по часовой стрелке. Эксцентрики 18 взаимодействуют с пазами 17, вызывая перемещение толкателей 15. При этом ось 9 изгибается, и давление перераспределяется по ширине полосы. И полоса получает большее обжатие посередине.

Калибровочный блок служит для устранения продольной разнотолщинности по длине полосы, а также для исправления дефектов неплоскостности. Так, при калибровке полосы с помощью представленного калибрующего блока изменение амплитуды волнистости (неплоскостность) снижается с 10-12 мм на 1 пог.м. до 5-7 мм на 1 пог.м. Таким образом, использование предлагаемого калибрующего блока позволит снизить отсортировку холоднокатаных полос по неплоскостности на 42-50%.

Подана заявка на изобретение «Калибрующий блок для регулирования плоскостности полосы». (Заявка от 03.09.2015 регистрационный номер №2015137420)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На базе двухвалкового листового стана 150x235 создана экспериментальная установка с микропроцессорной системой, которая позволяет контролировать усилие прокатки с точностью до 0,1 кН и с частотой 0,1 с. по длине прокатываемой полосы. Современный программно-технический комплекс на базе прокатного стана позволил уточнить закономерности влияния обжатия и условий контактного трения на силовые и деформационные показатели по длине полос из меди и латуни.

2. Полученные уравнения расчёта сопротивления деформации меди МЗ и латуней Л63 и ЛС59-1 для конкретного химического состава, позволяют при математическом моделировании повысить точность определения силовых и, как следствие, деформационных параметров холодной прокатки, а также показателей качества геометрии тонких полос на промышленных станах.

3. Полученные регрессионные уравнения, связывающие величины пределов текучести меди и латуней с величинами твёрдости, позволяют шире использовать современные портативные средства неразрушающего контроля механических свойств заготовок и готового проката.

4. Усовершенствована математическая модель и программный продукт, позволяющие осуществлять расчёт, как сопротивления деформации, давления, усилий и моментов прокатки, так и показателей точности полос, прокатываемых на одноклетевых и непрерывных станах. Гибкие настройки входных параметров программы позволяют моделировать работу большинства листовых станов холодной прокатки, тем самым значительно уменьшая затраты на проектирование и на анализ настроек этих станов в реальных условиях. Данный продукт успешно протестирован на Кировском заводе ОЦМ, Кольчугинском заводе ОЦМ и заводе «Кольчугцветметобработка».

5. Выполнены расчёты возможных отклонений параметров прокатки от их номинальных величин, а также оценено влияние этих отклонений на точность показателей прокатки. Наиболее сильное влияние может оказать неопределённость в изменении коэффициента трения. Показано, что уменьшение

обжатию снижает влияние изменений коэффициента трения на разнотолщинность, т.е. способствует повышению точности проката.

6. Уточнено уравнение для оценки устойчивости плоской формы проката с учётом не только упругой, но и пластической деформации по толщине полосы. Изучены параметры волнистости при потере устойчивости и повышена точность определения критических напряжений и режимов обжатию. Результаты подтверждены анализом экспериментальных данных.

7. Разработанная конструкция калибрующего блока для регулирования плоскостности, обеспечивает уменьшение разнотолщинности и улучшение плоскостности тонких полос. Предлагаемая конструкция калибрующего блока позволит улучшить плоскостность проката с 10-12 до 5-7 мм на 1 пог.м.

8. Результаты работы были использованы на предприятиях ООО «Кольчугинский завод по обработке цветных металлов» и ООО «Кольчугцветметобработка». Внедрение рациональных режимов прокатки и профилировок валков на листовом двухвалковом стане 350x450 и реверсивном листовом четырёхвалковом прокатном стане 150/500x400 позволило уменьшить поперечную разнотолщинность и улучшить плоскостность тонких полос на 2-4%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Шаталов Р. Л., Лукаш А. С., Луговской В. М. Компьютерное моделирование и проектирование процесса непрерывной прокатки полос. // Сборник докладов международной научно-технич. конф. (18-20 октября 2011 г.) «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию П. И. Полухина. М.: Изд. дом МИСиС, 2011, 586 с. (с. 32-36).

2. Максимов Е. А., Шаталов Р. Л., Лукаш А. С. Устойчивость плоской формы полосы с учетом упругопластического изгиба по толщине металла при тонколистовой прокатке. // Черные металлы, 2011, № 10, с. 9-13.

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

4. Максимов Е. А., Шаталов Р. Л., Лукаш А. С. Исследование работы калибрующего блока при снижении продольной разнотолщинности, устранения серповидности и дефекта кромок. // Сборник научных трудов международной научно-практической конф. (17-28 ноября 2014 г.) «Современная металлургия начала нового тысячелетия». К 80-летию НЛМК. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014, ч. 3, 259 с. (с. 80-87).

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

6. Лукаш А. С., Агафонов А. А., Русинов Е. В. Влияние смазки на деформационные и силовые показатели прокатки образцов из меди и латуни. // Материалы научно-технич. конференции «Студенческая научная весна 2015», «Машиностроительные технологии» (7-10 апр. 2015), Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана, М.: ООО «Квандорформ», 2015, - 1, CD-ROM, 2 с.

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

8. Максимов Е. А., Шаталов Р. Л., Верхов Е. Ю., Лукаш А. С. Управление поперечной разнотолщиной и плоскостностью тонких полос при прокатке. // Сб. науч. тр. международной научно-практ. конференции (8-11 декабря 2015 г.) «Современная металлургия нового тысячелетия» Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2015, ч. 1, 348 с. (с. 71-76).