

На правах рукописи



ПОСТЫЛЯКОВ Александр Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ
И КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
КАТАНКИ ИЗ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ МЕДИ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Логинов Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Лехов Олег Степанович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры «Автомобили и подъемно-транспортные машины»;

Веретенникова Ирина Андреевна, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Защита состоится « 11 » мая 2017 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=265996>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



М.Л. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Производство медной катанки является основным заготовительным процессом изготовления кабелей и проводов, шинопроводов, коллекторных профилей и других изделий электротехнического назначения, мировой объем потребления которых проявляет тенденцию к устойчивому росту. Поскольку качество указанных видов продукции во многом определяется свойствами катанки, используемой для их изготовления, требования к ней со стороны потребителей постоянно ужесточаются.

В настоящее время медную катанку изготавливают преимущественно высокопроизводительным методом непрерывного литья-прокатки по технологическим схемам Southwire's SCR, SMS Meer CONTIROD и CCR Properzi. Суммарная производственная мощность российских предприятий – изготовителей медной катанки полностью обеспечивает потребности кабельной промышленности России и позволяет экспортировать катанку на внешние рынки. При этом её качество должно соответствовать требованиям международных стандартов.

Вместе с тем некоторые особенности свойств кислородсодержащей меди и процесса изготовления из неё катанки обуславливают образование дефектов на стадиях литейного и прокатного переделов, что приводит к ухудшению качества продукции, вплоть до необходимости выбраковки отдельных партий. При этом уменьшается выход годного и увеличиваются материально-энергетические затраты на производство.

Таким образом, актуальной и важной задачей является комплексное повышение эффективности процесса производства медной катанки на основе разработки новых режимов прокатки и калибровок валков, обеспечивающих повышение её качества одновременно со снижением затрат по переделу.

В связи с вышеизложенным представляется актуальным проведение диссертационного исследования с целью: разработать научно обоснованные режимы прокатки и калибровки валков, направленные на повышение качества и экономию материально-энергетических ресурсов при производстве катанки из кислородсодержащей меди на непрерывном литейно-прокатном агрегате с применением

современных средств исследования и моделирования процессов обработки металлов давлением.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выполнить экспериментально-теоретическое исследование прокатки медной катанки, по результатам которого определить значения и характер распределения факторов, связанных с изнашиванием валков, а также установить особенности напряженно-деформированного состояния, неблагоприятные с позиции дефектообразования и износа.

2. Осуществить исследование износа валков, включающее в себя: определение основных видов процесса изнашивания, разработку методики количественного измерения износа, установление связи между основными факторами и проявлениями износа, по результатам которого разработать новую метаматематическую модель для прогнозирования износа валков применительно к горячей сортовой прокатке.

3. На основе экспериментальных данных адаптировать математическую модель расчета формоизменения к горячей прокатке кислородсодержащей меди в калибрах простой формы, с применением которой разработать новые режимы прокатки и калибровки валков с учетом как выявленных недостатков существующей калибровки, так и необходимости экономии материально-энергетических ресурсов.

4. Передать разработанные калибровки валков и режимы прокатки на предприятие для их последующего использования в производственном процессе.

Диссертационная работа проводилась в соответствии со следующими государственными планами и программами: «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (государственное задание в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014, № гос. регистрации 114122470051); «Создание новых технологических процессов, машин и систем автоматизированного проектирования в области обработки металлов давлением на основе современных достижений механики, прикладной математики и информатики» (программа Минвуза РФ, 2011–2013 гг.); План совместных

исследований от 29.01.2016 АО «Катур-Инвест» и кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Научную новизну представляют следующие разработки диссертации:

– методика и результаты исследования износа валков в процессе горячей сортовой прокатки кислородсодержащей меди, в частности установление основных видов процессов изнашивания, областей локализации износа и его количественное определение;

– закономерности распределения факторов износа по контактной поверхности, а также их связь с условиями процесса горячей сортовой прокатки кислородсодержащей меди;

– новая математическая модель распределения износа по ширине контактной поверхности ручьев калибров простой формы;

– закономерности взаимного количественного соотношения скоростей полосы и валков в клетях, имеющих групповой привод, а также их влияние на затраты энергии при прокатке.

Теоретическую и практическую значимость диссертации составляют следующие результаты:

– математическая модель определения размеров полосы по проходам, адаптированная для условий прокатки кислородсодержащей меди в калибрах простой формы;

– новая калибровка валков и режим прокатки в черновой группе клетей, обеспечивающие повышение однородности деформированного состояния, а также уменьшение значений факторов износа валков в некоторых проходах на 10–30 % по сравнению с существующими;

– рациональная энергосберегающая калибровка валков на основе системы овал – ребровой овал, обеспечивающая, при прочих равных условиях, снижение затрат энергии на 6,8 % по сравнению с существующей калибровкой на основе системы овал – круг;

– методика количественного определения затрат энергии на дополнительное скольжение полосы по поверхности валков, связанное с несоответствием фактических и кинематически возможных коэффициентов вытяжки в клетях с групповым приводом;

– методика проектирования согласованного скоростного режима прокатки на непрерывном стане, имеющем в своем составе клетки с индивидуальным и групповым приводом;

– рациональный энергосберегающий скоростной режим прокатки, в клетях с групповым приводом, обеспечивающий снижение затрат энергии на 8,7 % по сравнению с существующим;

– новая форма овальной заготовки для прокатки круглого сортового профиля, обеспечивающая за счет особенностей конфигурации снижение усилия и момента прокатки на 29 и 17 % соответственно, по сравнению с применением овальной заготовки простой формы.

Методы исследования: методы конечно-элементного моделирования, методы экспериментального исследования формоизменения в процессе непрерывной сортовой прокатки, методы экспериментального исследования износа валков, методы статистического анализа опытных данных, методы проектирования калибровок валков и режимов прокатки с применением экспертной системы «Технология сортовой прокатки».

На защиту выносятся:

– методика и результаты экспериментального исследования износа рабочих валков при горячей прокатке кислородсодержащей меди, а также математическая модель износа;

– закономерности распределения факторов износа по контактной поверхности валков, обусловленные условиями процесса прокатки в калибрах простой формы;

– математическая модель процесса формоизменения при горячей сортовой прокатке кислородсодержащей меди;

– новые калибровки валков и режимы прокатки медной катанки на литейно-прокатном агрегате, обеспечивающие повышение качества продукции и экономию материально-энергетических ресурсов;

– методика оценки затрат энергии на дополнительное скольжение полосы по поверхности валков и проектирования согласованного скоростного режима непрерывной прокатки в клетях с групповым приводом;

– овальная заготовка измененной формы, геометрические параметры которой определяются в зависимости от радиуса прокатываемого из неё круглого сортового профиля, обеспечивающая снижение усилия и момента прокатки, и таким образом, экономию энергетических затрат.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается применением современных методов исследования процессов обработки металлов давлением, основанных на методе конечных элементов, а также их сопоставлением с данными экспериментальных исследований, выполненных в условиях действующего производства.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: III международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (УрФУ, Екатеринбург, 2013); XIV международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых» (УрФУ, Екатеринбург, 2013); VII международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (УрФУ, Екатеринбург, 2014); XV международная научная конференция «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» (Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша, 2014); X международная научно-техническая конференция «Пластическая деформация металлов» (Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина, 2014); XXI международная научно-практическая конференция «Трубы – 2014» (ОАО «РосНИТИ», Челябинск, 2014); IV международная интерактивная

научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (УрФУ, Екатеринбург, 2014); Международная конференция «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (УрФУ, Екатеринбург, 2015); XVI международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых» (УрФУ, Екатеринбург, 2015); XVII международная научно-техническая конференция «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых» (УрФУ, Екатеринбург, 2016).

Публикации. По материалам диссертации в научно-технических изданиях опубликовано 17 работ, в том числе 7 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Одна статья вошла в международную базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 192 страницах машинописного текста, включая 69 рисунков, 23 таблицы, библиографический список из 149 наименований, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен литературно-аналитический обзор по теме диссертации. Описан технологический процесс производства катанки из меди М001 в условиях АО «Катур-Ивест» по схеме CONTIROD[®], предусматривающей литье заготовки, её непрерывную прокату с получением катанки диаметром 8 мм, подвергаемой после выхода из стана охлаждению, осветлению, нанесению защитного покрытия и смотке в бухты. Используемый прокатный стан состоит из черновой, промежуточной и чистовой групп, в которых чередуются горизонтальные и вертикальные клетки. В первых клетях черновой группы применяют систему ящичных калибров, в остальных – систему овал – круг.

Кроме того, выполнен подробный анализ проявлений, механизмов, факторов и моделей износа рабочих валков, а также современных методов моделирования,

исследования и проектирования процессов сортовой прокатки с использованием специализированных пакетов прикладных программ и экспертных систем.

Во второй главе с использованием метода конечных элементов решена задача моделирования прокатки медной катанки.

Результаты моделирования деформированного состояния сравнивали с полученными экспериментальным путем при отборе темплетов (недокатов) от полосы, установив их соответствие в отношении как формы, так и размеров по проходам: среднее значение относительного отклонения ширины δ_B составляет $m(\delta_B) = -0,013$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma(\delta_B) = 0,011$.

Выполненный анализ деформированного состояния позволил выявить недостатки существующей калибровки черновой группы с позиции дефектообразования и износа валков, а именно: образование двойной бочки при прокатке по схеме ящичный прямоугольник – ящичный квадрат (рисунок 1) и ребер на границе контактной поверхности при прокатке по схеме ящичный квадрат – овал (рисунок 2), что видно на конечно-элементных моделях (а) и на недокатах (б).

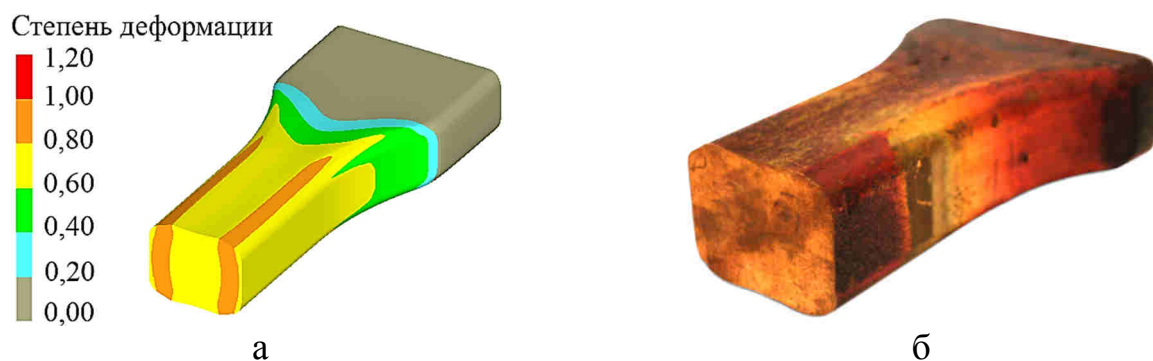


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель полосы (а) и недокат (б) при прокатке по схеме ящичный прямоугольник – ящичный квадрат

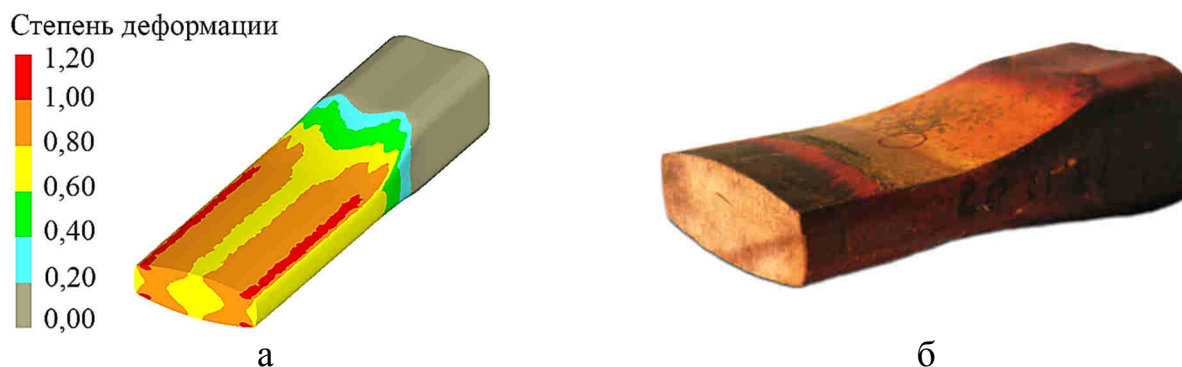


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель полосы (а) и недокат (б) при прокатке по схеме ящичный квадрат – овал

Значения скольжения и ассоциированных с ним факторов определяли по разработанной методике, состоящей в дискретном (кратном времени Δt) отслеживании компонентов напряженно-деформированного состояния полосы по траекториям движения её точек, принадлежащих контактной поверхности, и расчете в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3:

текущего радиуса R' и угла φ :

$$R' = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \varphi = \arccos \frac{b}{R'},$$

где $a = -x$, $b = Z^{\text{ЦВ}} - z$;

компонентов Δv_i ($i = x, y, z$) и вектора полного скольжения Δv ($\Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z$):

$$\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2 + \Delta v_z^2}, \quad \Delta v_x = v_x - v_x^{\text{B}}, \quad \Delta v_y = v_y, \quad \Delta v_z = v_z - v_z^{\text{B}},$$

где $v_x^{\text{B}} = v'_B \cdot \cos \varphi$, $v'_B = \omega_B \cdot R'$, $v_z^{\text{B}} = -v'_B \cdot \sin \varphi$;

пути скольжения c_M за время Δt и полного пути скольжения по траектории C_M :

$$c_M = \Delta v \cdot \Delta t, \quad C_M = \sum c_M;$$

напряжений τ и силы трения $F_{\text{тр}}$:

$$\tau = \sqrt{f_i \cdot f_i - \sigma_{\text{п}}^2}, \quad F_{\text{тр}} = \tau \cdot S_{\text{тр}},$$

где $f_i = \sigma_{ij} \cdot n_j$, $\sigma_{\text{п}} = \sigma_{ij} \cdot n_i \cdot n_j$, $j = x, y, z$;

мощности $N_{\text{тр}}$ и работы трения $A_{\text{тр}}$ по траектории соответственно времени начала t_0 и завершения t_1 скольжения:

$$N_{\text{тр}} = -F_{\text{тр}} \cdot \Delta v, \quad A_{\text{тр}} = \int_{t_0}^{t_1} N dt.$$

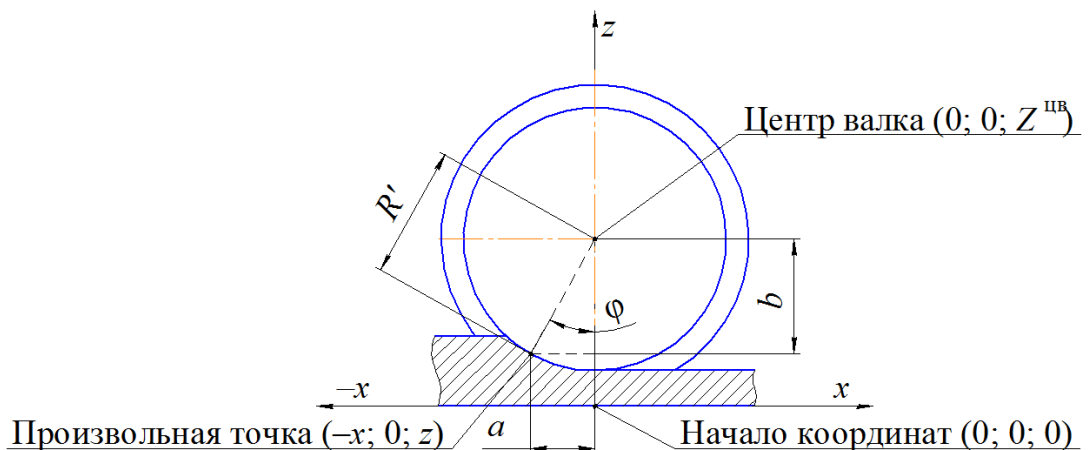


Рисунок 3 – Схема расчета текущего радиуса R' и текущего угла φ

Моделирование температурных полей валков осуществляли с различными тепловыми граничными условиями для их окружных областей, которые назначали в соответствии с доминирующим механизмом теплопередачи.

Таким образом, для черновой группы определили значения и построили эпюры распределения в функции относительной координаты по ширине контактной поверхности (рисунок 4) факторов, связанных с износом валков, а именно: нормального давления p , скольжения Δv , мощности $N_{тр}$ и работы трения $A_{тр}$, полного пути скольжения S_M , размаха (разности максимального и минимального значения) температур ΔT и степени деформации ϵ .

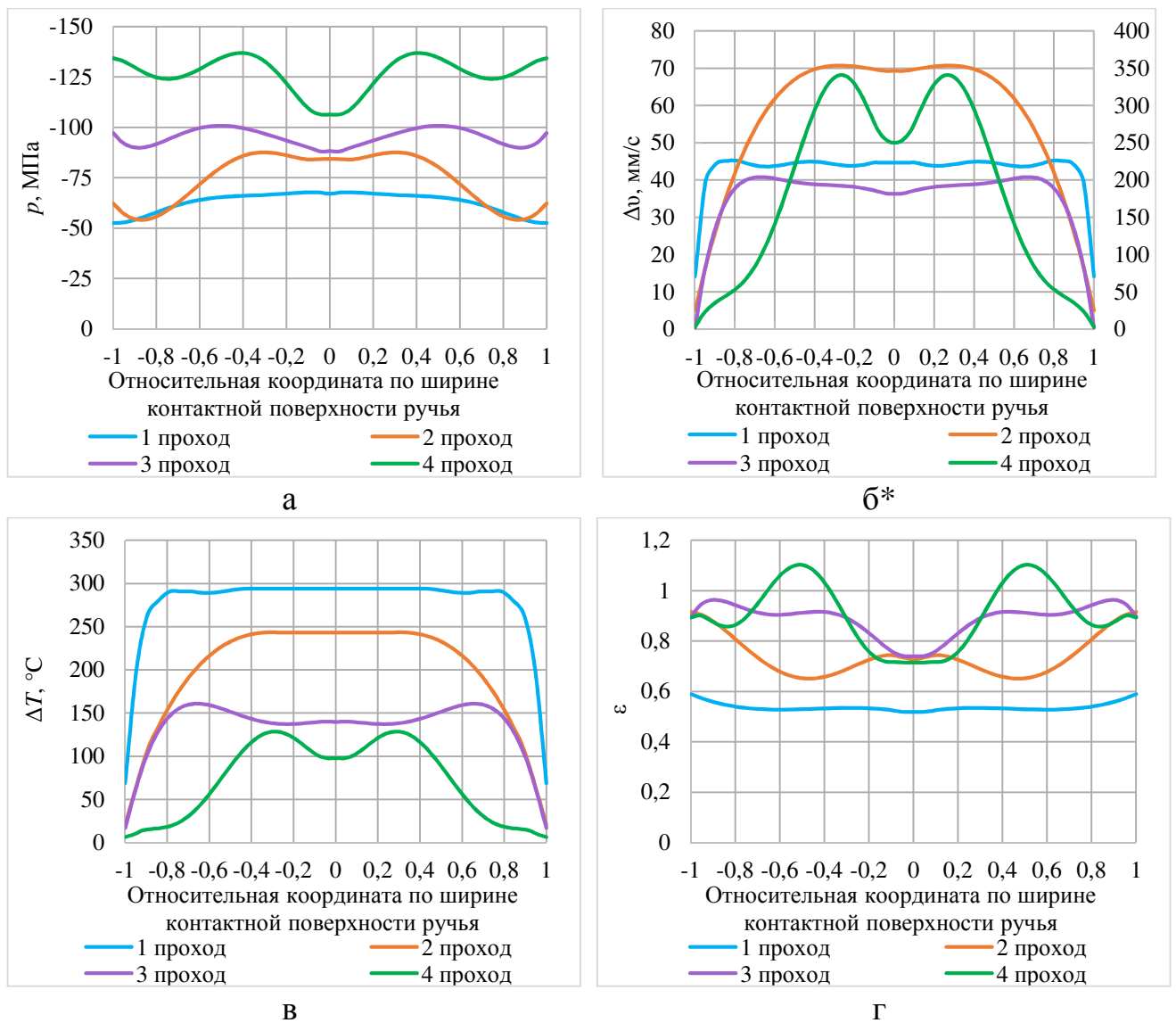


Рисунок 4 – Графики распределения: а – нормального давления p , б – скольжения Δv ; в – размаха температур ΔT ; г – степени деформации ϵ по ширине контактной поверхности в функции относительной координаты в проходах черновой группы

*Для проходов № 1, 2 используется основная (левая) ось ординат, для № 3, 4 – дополнительная (правая)

В результате анализа полученных эпюр установили, что максимальное нормальное давление, скольжение и размах температур при прокатке в овальном и круглом калибрах сосредоточены в областях локализации деформации, возникающих при обжати выпуклостей двойной бочки и ребер овального подката. Следовательно, там следует ожидать повышенного уровня термических и механических напряжений, и как следствие, ускоренного изнашивания валков.

В системе ящичных калибров, форма которых геометрически подобна форме подкатов, нормальное давление, скольжение и размах температур на большей части контактной поверхности (за исключением периферийных областей) распределены достаточно равномерно.

Кроме того, установили необходимость разработки новой калибровки валков черновой группы, обеспечивающей устранение выявленных особенностей деформированного состояния, неблагоприятных с позиции дефектообразования и износа.

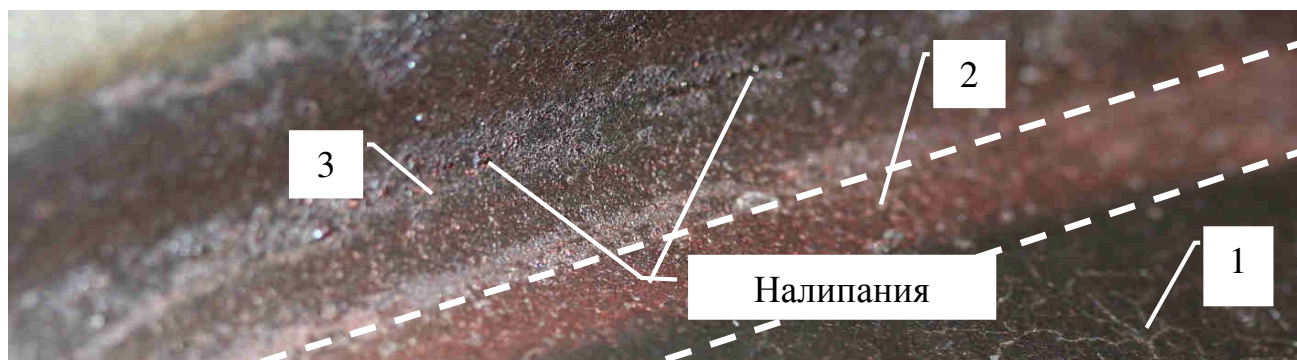
В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования износа валков черновой группы, для которых характерны наиболее тяжелые условия эксплуатации и, как следствие, повышенная интенсивность изнашивания. Валки изготовлены из стали Н13 – аналога стали 4Х5МФ1С.

На первой стадии исследования установили, что основными видами изнашивания валков при горячей прокатке кислородсодержащей меди, согласно терминологии ГОСТ 27674, являются усталостное и окислительное, проявляющиеся в образовании сетки трещин разгара в приповерхностных слоях, их окислении и выкрашивании, а также изнашивание при заедании, состоящее в налипании материала полосы на поверхность ручьев, характер которого разнится от равномерного налета до выраженных точечных и протяженных выпуклостей (рисунок 5).

Негативное влияние указанных видов изнашивания на качество производимой катанки заключается в ухудшении качества её поверхности и загрязнении выкрошившимися частицами материала валков.



а



б

Рисунок 5 – Фрагменты ручья валка, используемого в проходе № 2, до переточки с различных ракурсов и его образующие участки (границы показаны белой штриховой линией): 1 – дно; 2 – скругление; 3 – выпуск

На второй стадии исследования измеряли износ при переточке валков на токарном станке по следующей разработанной методике:

1. Устанавливали валок в токарный станок.
2. На внешнем торце валка наносили метки, определяющие положение измерительной шкалы.
3. После установки измерительной шкалы определяли границы контактной поверхности по отпечатку, оставленному полосой.
4. Перед осуществлением переточки измерительную шкалу снимали с валка, а после устанавливали обратно для выполнения измерений.
5. Для измерения высоты налипаний резец отводили на расстояние от поверхности ручья, после чего осуществляли переточку в несколько последовательных проходов с минимальным постоянным шагом (подводом резца), фиксируя моменты начала среза налипаний и достижения резцом поверхности.

6. После получения визуального доступа к приповерхностным слоям валка по ширине контактной поверхности выделяли характерные области, в пределах которых глубину трещин разгара в первом приближении считали равномерно распределенной. Признаками выделения являлись строение ручья и визуально наблюдаемые особенности трещинообразования, а именно различная плотность, ориентация и т. п. сетки трещин разгара. Первый признак применяли для ящичных калибров, ручьи которых образованы участками дна, скруглений и выпусков, второй – для овального и круглого калибров.

7. В ходе последующих переточек, выполняемых с постоянным шагом, максимальную глубину трещин разгара в каждой выделенной области фиксировали по факту их полного исчезновения. При наблюдении закономерной неравномерности глубины трещин в пределах выделенной области осуществляли её дополнительное разбиение на подобласти.

8. После полного удаления трещин на всей площади контактной поверхности измерение завершали, а валок извлекали из станка.

Результаты измерения износа как распределения глубины трещин разгара по ширине контактной поверхности ручьев приведены на графике (рисунок 6). Также выявили, что максимальная высота налипания меди не превышает 0,3 мм.

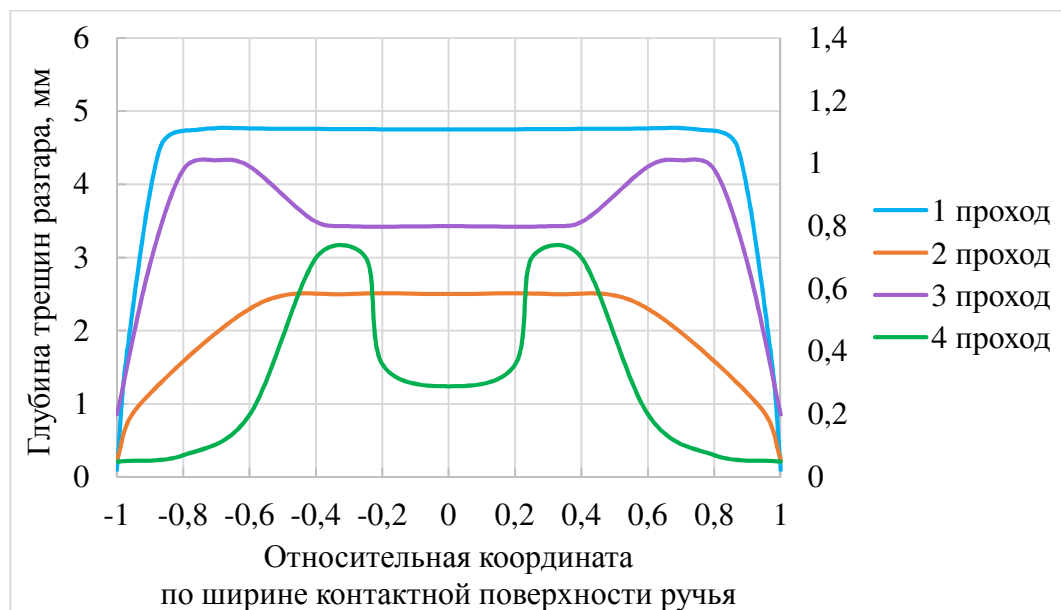


Рисунок 6 – Распределение глубины трещин по ширине контактной поверхности ручьев в проходах черновой группы*

*Для проходов № 1, 2 используется основная (левая) ось ординат, для № 3, 4 – дополнительная (правая)

В результате выполненных измерений установили, что наибольший износ, характеризующийся относительно равномерным распределением по ширине контактной поверхности, наблюдается в первых проходах черновой группы, в которых используют ящичные калибры. Причиной этого является повышенная температура нагрева поверхности валков. В последних проходах черновой группы, в которых применяют систему овал – круг, износ меньше, чем в первых проходах, что связано с более низкими температурами нагрева поверхности валков, но при этом неравномерность его распределения выражена сильнее.

С использованием метода параллельных рядов установили, что неравномерность распределения износа связана с комплексным действием следующих факторов: размаха температур, скольжения, нормального давления и степени деформации, области максимальных значений которых совпадают с областями максимального износа.

На основе результатов статистического анализа выборок опытных данных установили, что твердость поверхности валка первого прохода черновой группы до прокатки и при достижении этим же валком предельного износа (выработки до минимально возможного диаметра) одинаковы. Валок первого прохода выбрали для проведения измерений вследствие наиболее высоких значений установленных температур его поверхности, что позволяет распространить результат на валки остальных проходов, заключив, что твердость их рабочего слоя сохраняется до конца регламентированного срока эксплуатации и не является причиной неравномерного распределения износа по ширине ручьев.

Разработана новая модель для прогнозирования распределения износа по ширине контактной поверхности как глубины трещин разгара W_j , определяемая формулой

$$W_j = W_{i(max)} \cdot (u_j / u_{i(max)}), \quad (1)$$

где $W_{i(max)}$ – максимальная глубина трещин разгара в i -м проходе, $u_j = (C_{Mj} / C_{Mi(max)}) \cdot \epsilon_j$ – вспомогательная функция факторов износа, C_{Mj} – текущее j -е значение полного пути скольжения в функции относительной координаты по

ширине контактной поверхности, $C_{Mi(max)}$ – максимальное значение полного пути скольжения, ε_j – текущее значение степени деформации, $u_{i(max)}$ – максимальное значение вспомогательной функции u_j .

Результаты расчета износа по формуле (1) показали большую сходимость с полученными экспериментальным путем, характеризующуюся следующими значениями коэффициента детерминации R_i^2 в i -х проходах черновой группы: $R_1^2 = 0,96$, $R_2^2 = 0,94$, $R_3^2 = 0,88$, $R_4^2 = 0,84$.

В четвертой главе разработаны новые калибровки валков и режимы прокатки, направленные на повышение качества производимой катанки и снижение затрат энергии по переделу.

На основе результатов промышленного экспериментального исследования предложили математическую модель расчета коэффициента вытяжки λ , адаптированную для случая горячей сортовой прокатки кислородсодержащей меди, определяемую по формуле

$$\lambda = 1 + C_\lambda \cdot (\lambda_p - 1), \quad (2)$$

где C_λ – поправочный коэффициент, учитывающий особенности пластического течения меди в различных системах калибров (таблица 1); λ_p – коэффициент вытяжки, являющийся функцией приведенного диаметра валков, отношения сторон калибра, выпуска (для ящичных калибров), отношения сторон полосы до прокатки, коэффициента обжатия, степени заполнения предыдущего калибра.

Таблица 1 – Значения поправочного коэффициента для расчета λ

| Система калибров | C_λ | Система калибров | C_λ |
|----------------------|-------------|------------------|-------------|
| Ящичные калибры | 1,153 | Овал – круг | 1,508 |
| Прямоугольник – овал | 1,339 | Круг – овал | 1,798 |

В результате сравнения расчетных, λ , и опытных, $\lambda_{оп}$, значений коэффициента вытяжки установили, что адаптированная модель позволяет определять его с достаточно высокой точностью (рисунок 7), характеризующейся

средним значением относительного отклонения $\delta_{\lambda(p-оп)} = (\lambda_{оп} - \lambda)/(\lambda_{оп} - 1)$, равным $m(\delta_{\lambda(p-оп)}) = -0,005$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma(\delta_{\lambda(p-оп)}) = 0,067$.

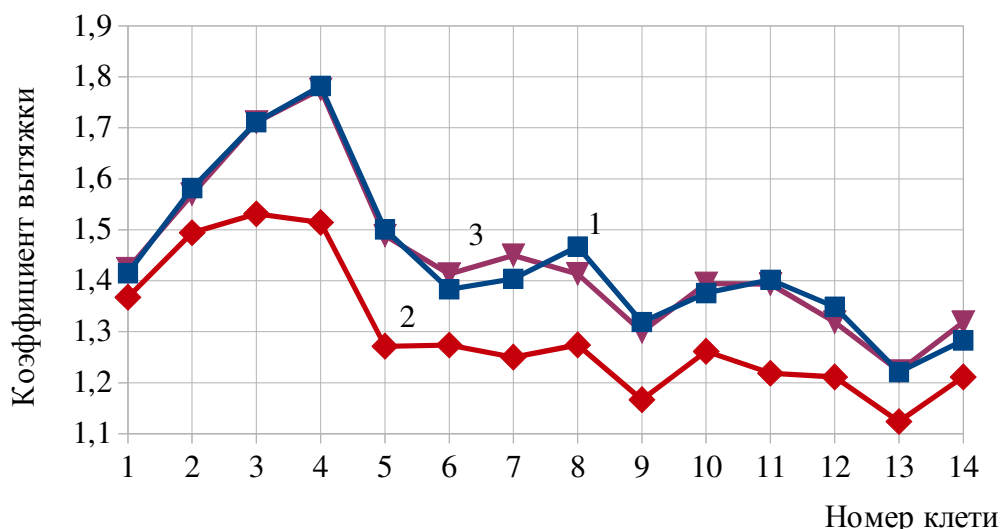


Рисунок 7 – Распределение коэффициентов вытяжки по проходам: 1 – опытные значения $\lambda_{оп}$; 2 – расчетные значения λ_p без поправочного коэффициента; 3 – расчетные значения λ с поправочным коэффициентом

С использованием адаптированной модели разработали новую калибровку валков и режим прокатки в черновой группе при условии сохранения в ней суммарного коэффициента вытяжки. Для устранения образования двойной бочки при прокатке по схеме ящичный прямоугольник – ящичный квадрат дно ящичного прямоугольного калибра выполнили с выпуклостью по отношению к существующему (прямолинейному в плане). Одновременно дно ящичного квадратного калибра также выполнили по радиусу, что увеличивает стеснение уширения полосы на уровне выпусков, переводя его в область разъема калибра. Существующий овальный калибр заменили плоским овальным, обеспечивающим, благодаря близости значений радиуса его боковых стенок и следующего круглого калибра, равномерное заполнение последнего. Круглый калибр при этом оставили без изменений.

Предлагаемая калибровка валков обеспечивает значительное повышение однородности деформированного состояния при прокатке в плоском овальном и круглом калибрах (рисунок 8), что подтверждается меньшими значениями коэффициентов неоднородности деформации K_{hi} (отношение максимальной

степени деформации к минимальной в i -м проходе), равными соответственно $K_{н3}^* = 1,16$ и $K_{н4}^* = 1,20$ по сравнению с существующей калибровкой, для которой эти значения составляют $K_{н3} = 1,30$ и $K_{н4} = 1,54$.

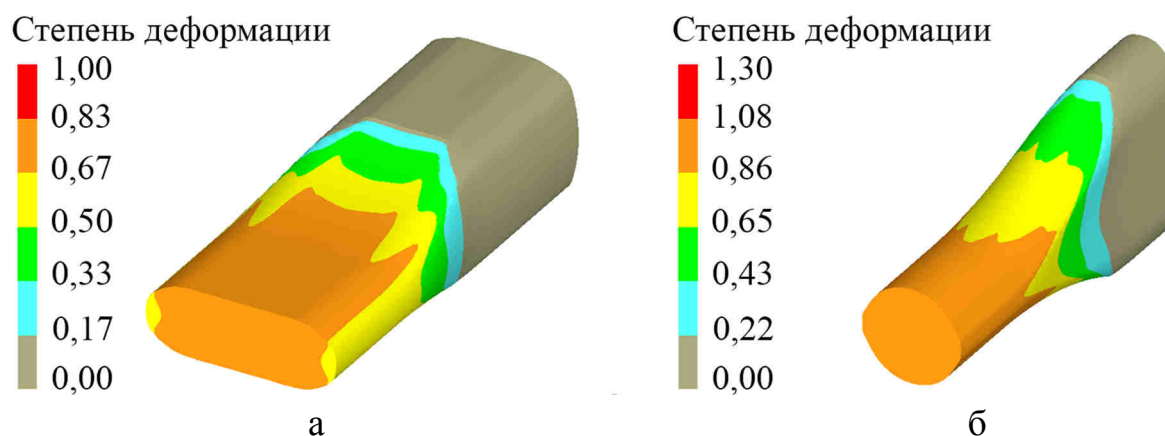


Рисунок 8 – Деформированное состояние полосы при использовании предлагаемой калибровки валков черновой группы: а – схема прокатки ящичный квадрат – плоский овал; б – схема прокатки плоский овал – круг

Кроме того, предлагаемая калибровка валков и режим прокатки позволяют уменьшить значения факторов износа валков, а именно скольжения и нормального давления, в ряде проходов на 10–30 %. Уменьшение скольжения было достигнуто подбором скоростей вращения валков, при которых снижаются его максимальные значения на входе очага деформации, а уменьшение нормального давления – снижением величины абсолютного обжатия при выполнении дна ящичного прямоугольного калибра с выпуклостью и ликвидацией выраженных ребер овального подката.

Результаты решения задачи моделирования прокатки в промежуточной группе позволили определить рациональную систему калибров из условия минимизации затрат энергии, которые оценивали по величине суммарного крутящего момента $M_{вал\Sigma}$ и удельного расхода энергии на деформацию W . Установили, что по сравнению с существующей системой калибров овал – круг таковой является система овал – ребровой овал. Достоверность полученных результатов подтвердили сравнением расчетного и опытного значений коэффициента загрузки электродвигателя промежуточной группы, относительное

отклонение которых составляет 8,7 %, а также соответствием выявленных закономерностей изменения крутящих моментов по проходам известным положениям теории прокатки.

На основе выбранной рациональной системы калибров овал – ребровой овал разработали новую калибровку валков, которая позволяет уменьшить затраты энергии на прокатку в промежуточной группе на 6,8 %, или на 1,1 кВт·ч/т в абсолютном выражении. При годовом объеме производства на уровне 300 тыс. т экономия энергозатрат может достигать 330 МВт·ч.

По результатам экспериментально-теоретического исследования формоизменения выявили наличие отклонения $\delta_{\lambda(\phi-k)} = (\lambda - \lambda_k) / (\lambda_k - 1)$ фактических λ и кинематических λ_k коэффициентов вытяжки в проходах промежуточной группы клетей, имеющей групповой привод, среднее значение которого составляет $m(\delta_{\lambda(\phi-k)}) = -0,051$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma(\delta_{\lambda(\phi-k)}) = 0,109$.

Вследствие наличия обозначенного отклонения λ от λ_k в промежуточной группе линейная скорость вращения валков не соответствует скорости движения полосы (происходит отклонение от константы калибровки непрерывного стана), что является причиной появления дополнительного скольжения по поверхности валков, приводящего к интенсификации процессов их изнашивания, а также увеличению затрат энергии на прокатку.

Для количественной оценки обозначенных затрат разработали методику, согласно которой последовательно рассчитывали следующие величины:

1. Скорость полосы в нейтральном сечении i -го прохода по формуле

$$U_{ni} = U_{1i} / (1 + S_i),$$

где S_i – опережение (рассчитывали по известной формуле Эжелунда); U_{1i} – скорость полосы на выходе очага деформации.

2. Катающий диаметр валков в i -м проходе по формуле

$$D_{ki} = D_{\delta i} + s_i + \omega_{1i} / B_{1i},$$

где $D_{\delta i}$ – диаметр валков по буртам, s_i – межвалковый зазор, ω_{1i} и B_{1i} – площадь поперечного сечения и ширина полосы на выходе очага деформации.

3. Горизонтальную проекцию вектора линейной скорости валков, соответствующей их катающему диаметру в i -м проходе по формуле

$$U_{\text{вал } i}^* = \pi \cdot D_{ki} \cdot n_{\text{дв}} \cdot \cos \gamma_i / 60 \cdot i_{pi},$$

где $n_{\text{дв}}$ – частота вращения электродвигателя; γ_i – угол нейтрального сечения (рассчитывали по известной формуле Экелунда – Павлова); i_{pi} – передаточное число редуктора.

4. Среднее сопротивление деформации в проходе по формуле

$$\sigma_{si} = 600 \cdot \frac{\varepsilon_i^{0,213} \cdot \xi_i^{0,09}}{\exp(0,00317 \cdot t_i)},$$

где ε_i , ξ_i , t_i – средние значения степени, скорости и температуры деформации в i -м проходе.

5. Дополнительную мощность трения скольжения по формуле

$$\Delta N_{\text{ск } i} = 2 \cdot \tau_{\text{тр } i} \cdot B_{li} \cdot l_{di} \cdot (U_{\text{вал } i}^* - U_{\text{н } i}),$$

где $\tau_{\text{тр } i}$ – среднее напряжение трения на контактной поверхности (рассчитывали в соответствии с законом Прандтля – Зибеля); l_{di} – длина очага деформации.

6. Затраты энергии на дополнительное скольжение по формуле

$$\Delta W_i = \frac{\Delta N_{\text{ск } i}}{\Pi},$$

где Π – производительность прокатного стана.

В результате выполнения расчетов установили, что суммарное значение затрат энергии ΔW , вызванных наличием дополнительного скольжения, составляет 2,9 кВт·ч/т, или 8,7 % от величины полных затрат энергии на прокатку в промежуточной группе.

Проектирование согласованного скоростного режима прокатки в промежуточной группе осуществляли по разработанной методике, состоящей в расчете характеристик формоизменения (λ_i , ω_{li} , B_{li}), скоростных параметров (U_{0i} , U_{1i} , $U_{\text{н } i}$), катающих диаметров валков D_{ki} и требуемых частот вращения двигателя $n_{\text{дв } i}$, а также в подборе диаметров валков $D_{\text{б } i}$, при которых отклонение $n_{\text{дв } i}$ по проходам от среднего значения $m(n_{\text{дв } i})$ будет минимально возможным.

Разработанный скоростной режим обеспечивает выполнение константы калибровки непрерывного стана (среднее значение $\delta_{\lambda(\phi-\kappa)}$ составляет $m(\delta_{\lambda(\phi-\kappa)}) = -0,002$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma(\delta_{\lambda(\phi-\kappa)}) = 0,065$), устранение дополнительного скольжения и уменьшение затрат энергии на прокатку, экономия которых может достигать 900 МВт·ч в год в абсолютном выражении.

Для снижения усилия и мощности при прокатке круглого профиля радиуса R_{κ} также предлагается новая форма заготовки, имеющая в поперечном сечении контур овала (рисунок 9), образуемого (на примере квадранта I) элементами трех сопряженных геометрических объектов: окружности 1, эллипса 2 и окружности 3.

Центр окружности 1 радиусом R_1 расположен на горизонтальной оси симметрии на расстоянии a от точки пересечения осей O . Центр эллипса 2 совпадает с точкой пересечения осей. Большая полуось эллипса 2 равна a , малая полуось равна b . Окружность 1 и эллипс 2 сопрягаются между собой посредством дуги окружности 3 радиусом R_2 , центр которой находится в квадранте III. Его положение определяется значением радиуса R_2 при условии гладкого сопряжения объектов 1 и 2. Определяющими параметрами в общем случае являются H_0 , B_0 , R_1 , R_2 . Производные параметры рассчитывали по формулам $a = H_0 / 2 - R_1$, $b = B_0 / 2$.

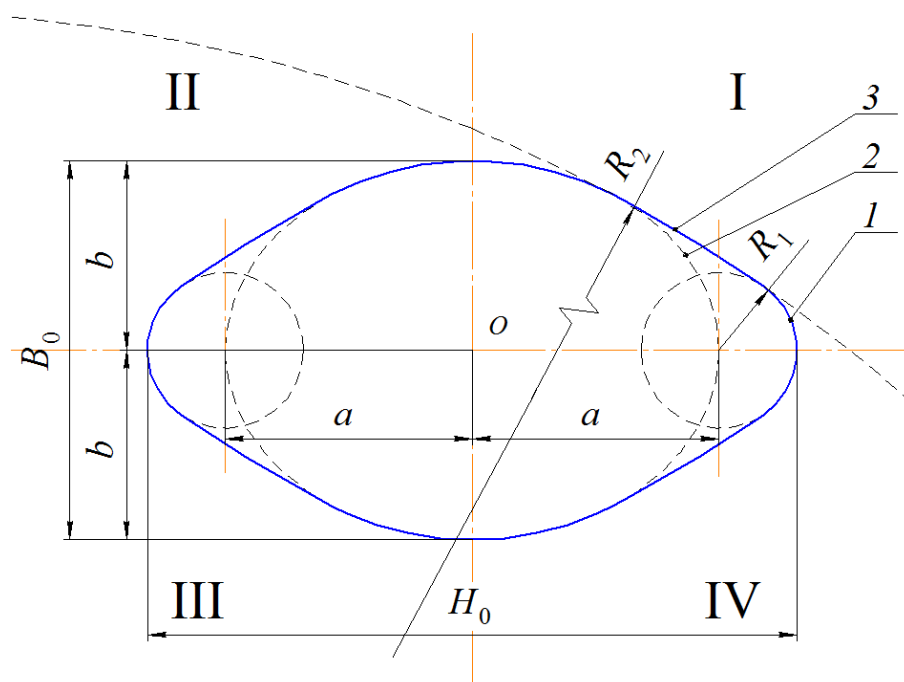


Рисунок 9 – Форма поперечного сечения заготовки

По результатам вычислительного эксперимента, который провели с использованием метода конечных элементов при варьировании радиусов образующих окружностей R_1 и R_2 , установили, что при $R_1 = (0,250 - 0,375) \cdot R_k$ и $R_2 = (5,00 - 6,25) \cdot R_k$ значения энергосиловых параметров прокатки достигают минимума, в частности, усилие снижается на 29 %, а момент на 17 % по сравнению с применением овальной заготовки, полученной в овальном калибре. Таким образом, применение заготовки предлагаемой конфигурации обеспечивает экономию энергозатрат при прокатке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты.

1. На основе теоретического исследования прокатки катанки из кислородсодержащей меди с использованием метода конечных элементов построены эпюры параметров, описывающих напряженно-деформированное состояние полосы и температурное состояние валков, установлены закономерности их распределения по контактной поверхности, связанные с условиями процесса прокатки.

2. Проведено экспериментальное исследование износа валков при горячей сортовой прокатке кислородсодержащей меди с использованием разработанной методики его измерения при переточке. Определены основные виды процессов изнашивания и распределение соответствующего им износа по контактной поверхности. Установлено соответствие между экстремумами проявлений износа и связанных с ним факторов, а именно размаха температур, скольжения, нормального давления и степени деформации.

3. Разработана новая математическая модель для прогнозирования распределения износа по ширине контактной поверхности ручьев калибров простой формы при горячей прокатке кислородсодержащей меди.

4. Проведена модернизация математической модели расчета формоизменения применительно к горячей сортовой прокатке кислородсодержащей меди, с применением

которой разработаны новая калибровка валков и режим прокатки в черновой группе клетей, обеспечивающие повышение однородности деформированного состояния, а также уменьшение факторов износа, в ряде проходов на 10–30 % по сравнению с существующими.

5. Выбрана более экономичная с точки зрения затрат энергии система калибров овал – ребровой овал, на основе которой, с применением модернизированной модели, разработана рациональная энергосберегающая калибровка валков промежуточной группы клетей, обеспечивающая снижение затрат энергии на 6,8 % по сравнению с существующей калибровкой на основе системы овал – круг.

6. Разработана методика оценки затрат энергии на дополнительное скольжение в клетях с групповым приводом.

7. Разработана методика проектирования согласованного скоростного режима прокатки на непрерывном стане, имеющем в своем составе клетки с индивидуальным и групповым приводом, посредством подбора диаметров рабочих валков исходя из константы калибровки, с использованием которой разработан рациональный энергосберегающий скоростной режим прокатки для клетей с групповым приводом, обеспечивающий снижение затрат энергии на 8,7 % по сравнению с существующим режимом.

8. Разработана новая форма овальной заготовки (направлена заявка на полезную модель № 2016108073 с приоритетом от 04.03.2016) для прокатки круглого профиля, обеспечивающая за счет особенностей конфигурации, снижение энергосиловых параметров процесса на 20–30 % по сравнению с применением овальной заготовки, полученной в однорадиусном овальном калибре.

9. Разработанные режимы прокатки и калибровки валков приняты к использованию на АО «Катур-Инвест». Математическая модель расчета формоизменения, методики оценки затрат энергии на дополнительное скольжение и проектирования согласованного скоростного режима внедрены в экспертную систему «Технология сортовой прокатки», используемую в учебном процессе.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах
В рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ:**

1. Постыляков А. Ю. Адаптация алгоритма расчета формоизменения металла при прокатке медной катанки / Ю. В. Инатович, Ю. Н. Логинов, А. Ю. Постыляков // Производство проката. – 2014. – № 5. – С. 16 – 21 (0,7 п.л./0,23 п.л.).

2. Постыляков А. Ю. Напряженно-деформированное состояние медной полосы при прокатке в прямоугольном калибре / Ю. Н. Логинов, А. Ю. Постыляков, Ю. В. Инатович // Цветные металлы. – 2015. – № 11. – С. 72 – 75 (0,5 п.л./0,16 п.л.).

Postylyakov A. Yu. Stress-strain state of copper bar during the rolling process implemented in box groove / Yu. N. Loginov, A. Yu. Postylyakov, Yu. V. Inatovich // Tsvetnye Metally (Non-Ferrous metals). – 2015. – № 11. – P. 72 – 75 (0,5 п.л./0,16 п.л.).

3. Постыляков А. Ю. Влияние натяжения между литейным агрегатом и прокатным станом на напряженное состояние металла / Ю. Н. Логинов, А. Ю. Постыляков // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). – 2015. – № 3. – С. 26 – 32 (0,8 п.л./0,4 п.л.).

4. Постыляков А. Ю. Анализ деформаций медной катанки при чистовом проходе горячей прокатки / Ю. Н. Логинов, А. Ю. Постыляков // Кабели и провода. – 2015. – № 3. – С. 19 – 22 (0,5 п.л./0,2 п.л.).

5. Постыляков А. Ю. Затраты энергии при прокатке медной катанки на непрерывном литейно-прокатном агрегате / Ю. В. Инатович, А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов, А. Ю. Зуев // Производство проката. – 2015. – № 5. – С. 42 – 45 (0,4 п.л./0,1 п.л.).

6. Постыляков А. Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния в черновых проходах непрерывной прокатки электротехнической меди / Ю. Н. Логинов, А. Ю. Постыляков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – № 2. – С. 68 – 73 (0,7 п.л./0,35 п.л.).

7. Постыляков А. Ю. Выбор оптимальных систем калибров для прокатки медной катанки на литейно-прокатном агрегате / Ю. В. Инатович, А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов, А. Ю. Зуев // Производство проката. – 2016. – № 9. – С. 20 – 25 (0,7 п.л./0,18 п.л.).

В сборниках трудов научных конференций:

8. Постыляков А. Ю. Вариации сопротивления деформации при горячей сортовой прокатке медной заготовки / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов, Ю. В. Инатович // Сб. тр. III международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 85 – 87 (0,18 п.л./0,06 п.л.).

9. Постыляков А. Ю. Деформации при горячей сортовой прокатке медной заготовки / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов, Ю. В. Инатович // Сб. тр. XIV международной научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых». – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 180 – 183 (0,18 п.л./0,06 п.л.).

10. Постыляков А. Ю. Особенности процессов производства медной катанки / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр. VII международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 320 – 324 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

11. Постыляков А. Ю. Исследование влияния размера выпуска калибра на деформированное состояние полосы методом МКЭ-моделирования / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр. XV международной научной конференции «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». – Ченстохова: Политехника Ченстоховска, 2014. – С. 276 – 279 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

12. Постыляков А. Ю. Расчет деформированного состояния медной полосы при горячей сортовой прокатке / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр. X международной научно-технической конференции «Пластическая деформация металлов». – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 91 – 94 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

13. Постыляков А. Ю. Неоднородность деформации в процессе сортовой прокатки медных заготовок / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр. XXI международной научно-практической конференции «Трубы – 2014». – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014. – С. 278 – 280 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

14. Постыляков А. Ю. МКЭ-моделирование процесса дефектообразования при горячей сортовой прокатке меди / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр.

IV международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 137 – 141 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

15. Постыляков А. Ю. Конечно-элементное моделирование формоизменения прямоугольной медной заготовки при сортовой прокатке / А. Ю. Постыляков, Ю. Н. Логинов // Сб. тр. международной конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика». – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 142 – 148 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

16. Постыляков А. Ю. Зависимость энергосиловых параметров прокатки медной катанки от системы калибров в последнем чистовом проходе / А. А. Белоногова, А. Ю. Постыляков // Сб. тр. XVI международной научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых». – Екатеринбург: УрФУ, 2015. Том 2. – С. 251 – 254 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

17. Постыляков А. Ю. Особенности износа валков при горячей прокатке меди / А. Ю. Постыляков, С. А. Буньков, Ю. В. Инатович // Сб. тр. XVII научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых». – Екатеринбург: УрФУ, 2016. Том 2. – С. 323 – 326 (0,3 п.л./0,1 п.л.).