

На правах рукописи

Горбунов

ГОРБУНОВ Кирилл Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ
В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ АСИММЕТРИИ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Липецк – 2025

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением»
в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: **МАЗУР Игорь Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Юсупов Владимир Сабитович**
доктор технических наук,
заместитель директора
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова»
Российской академии наук

Шалаевский Дмитрий Леонидович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры Металлургии,
машиностроения и технологического
оборудования,
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный
университет»

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет»**

Защита диссертации состоится 16 мая 2025 года в 12:00 на заседании
диссертационного совета 24.2.323.01 на базе ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк,
ул. Московская, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический университет» и на сайте www.stu.lipetsk.ru.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью
организации, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба
отправлять по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, Диссертационный
совет 24.2.323.01. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail:
d212.108.03@stu.lipetsk.ru.

Автореферат разослан «14» апреля 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.323.01,
д-р техн. наук, доцент



И.А. Седых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Прокатка плоских полос – наиболее часто используемый процесс пластической обработки металлов. Производство плоского проката и его применение в различных отраслях промышленности, таких как оборонная, автомобильная, энергетика, судостроение и др., свидетельствуют об уровне развития не только металлургического производства, но и государства в целом.

В последние годы, помимо увеличения производства проката типоразмеров и марок сталей, освоенных ранее, потребителями металлопродукции востребованы стали с новыми свойствами. И если геометрические свойства проката в значительной степени обеспечены за счёт современных цифровых систем управления, внедрённых на действующих станах горячей и холодной прокатки за последние 10 –15 лет, то производство, например, высокопрочных сталей или сталей с мелкозернистой структурой зачастую затруднено ограничениями, предъявляемыми к элементам прокатного оборудования, спроектированного и эксплуатируемого с 60 – 80-х годов прошлого века. Прокатка таких сталей зачастую приводит к аварийным ситуациям из-за перегрузок в главных линиях клетей станов, повышенному износу рабочих валков и снижению выхода годной продукции.

Одним из перспективных способов придать “новую жизнь” действующим прокатным станам является использование искусственной асимметрии. Целенаправленное создание условий геометрической и/или скоростной асимметрии в очаге деформации при тонколистовой прокатке позволяет снизить усилие прокатки и сформировать уникальное напряженно-деформированное и тепловое состояние металла в процессе прокатки, и тем самым обеспечить получение проката с новыми свойствами.

Таким образом, разработка технологических решений в области тонколистовой прокатки по использованию искусственной асимметрии является важной и актуальной задачей для металлургической и других стратегических отраслей промышленности Российской Федерации.

Цель работы и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в снижении энергосиловых параметров прокатки и совершенствовании технологии производства тонколистового проката в условиях искусственной асимметрии.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Обзор современных технологий, используемого оборудования и анализ факторов, влияющих на реализацию прокатки тонколистового металла при асимметрии, выбор и обоснование методик исследования.
2. Разработка компьютерной модели асимметричной тонколистовой прокатки с использованием программного комплекса «DEFORM-3D».
3. Исследование реологических свойств сталей текущего производства в диапазонах температур и деформации, применяемых в режимах производства тонколистового проката, уточнение теплофизических коэффициентов.

4. Численные и физические исследования влияния параметров асимметрии и режимов прокатки на энергосиловые параметры, геометрию проката и структуру металла.

5. Разработка рекомендаций по применению искусственной асимметрии на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000 и на стане порулонной холодной прокатки 1400.

Тематика работы. Выносимые на защиту результаты соответствуют следующим направлениям исследований паспорта специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением: п.1. «Исследование и расчёт деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов»; п.2. «Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»; п.4. «Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции»; п.6. «Разработка способов, процессов и технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Разработана в программном комплексе «DEFORM-3D» компьютерная модель тонколистовой прокатки для расчёта напряжённо-деформированного и теплового состояний металла, отличающаяся от известных моделей учётом искусственной асимметрии, связанной с геометрическими и/или скоростными параметрами рабочих валков, уточнёнными реологическими и теплофизическими свойствами сталей при горячей и холодной прокатке с учётом истории нагружения. С использованием модели определена область применения процесса асимметрии при тонколистовой прокатке.

2. Установлены закономерности изменения напряжённо-деформированного состояния полос при использовании искусственной асимметрии в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что применение скоростной асимметрии на верхних и нижних рабочих валках в диапазоне $A_v = 1,05\text{--}1,3$ обеспечивает снижение усилия прокатки до 30% при прочих равных условиях и исключает застревание в линии стана головных частей прокатываемых полос из-за искривления.

3. На основе моделирования процесса прокатки в условиях искусственной асимметрии доказано, что получение более мелкой зернистой структуры при горячей прокатке связано с увеличением интенсивности сдвиговых деформаций в очаге деформации по сравнению с симметричной прокаткой. Увеличение интенсивности деформации сдвига подтверждено экспериментально дополнительным тепловыделением в очаге деформации (повышение температуры при $A_v = 1,5$ и 3 составило 11°C и 13°C).

4. Разработаны научно обоснованные рекомендации по использованию искусственной асимметрии на действующих промышленных станах горячей и холодной прокатки, основанные на результатах компьютерного моделирования и экспериментах в лабораторных условиях и позволяющие реализовать различные механизмы управления искусственной асимметрией прокатки.

Практическая значимость:

1. Полученные в ходе исследования реологические и теплофизические свойства сталей могут быть использованы в качестве справочных данных при решении прикладных задач процессов обработки металлов давлением, в том числе и при конечно-элементном моделировании.

2. В ходе лабораторных экспериментов были получены результаты, отражающие влияние искусственной асимметрии (скоростной и разницы диаметров валков) на энергосиловые параметры, профиль и структуру стали при горячей и холодной прокатке.

3. Компьютерная модель асимметричной горячей и холодной прокатки позволяет проводить расчёт энергосиловых параметров на существующих широкополосных станах с учётом особенностей и ограничений используемого оборудования, а также осуществлять прогноз основных параметров процесса прокатки на стадии проектирования новых станов.

4. Работа по теме исследования проводилась в рамках научного проекта, поддержанного грантом РНФ №23–79–30015 «Принципиально новые эффекты асимметричного пластического деформирования металлов и сплавов и их приложение к созданию инновационных производственных технологий» по государственному заданию Министерства образования и науки России (<https://rscf.ru/project/23-79-30015/>), а также научно-исследовательской практики (приказ МИНОБРНАУКИ России от 29.08.2022 г. №825) в Ляонинском университете науки и технологии (г. Ляонин, Китай), стажировок в Ченстоховском политехническом университете (г. Ченстохова, Польша) в 2018 и 2019 годах и по договорам с ПАО «НЛМК».

5. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ЛГТУ на кафедре обработки металлов давлением при подготовке специалистов по направлению 22.03.02 «Металлургия» профиль «Обработка металлов давлением» и 22.04.02 «Металлургия» профиль «Инжиниринг инновационных технологий производства и обработки проката».

6. Результаты расчёта из диссертационной работы переданы в Дирекцию по разработке новых технологий процесса ПАО «НЛМК» для использования при освоении технологий горячей и холодной прокатки перспективных марок сталей на непрерывном широкополосном стане 2000 и стане порулонной прокатки 1400.

7. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы на металлургических предприятиях, производящих горячекатаный тонколистовой прокат (ПАО «Северсталь», ПАО «ММК» и др.).

Объект исследования. Технология тонколистовой горячей и холодной прокатки.

Предмет исследования. Влияние искусственной асимметрии на энергосиловые параметры, кривизну и структуру при тонколистовой прокатке.

Методология и методы исследований. В работе использован комплексный метод исследования, включающий теоретический анализ процессов тонколистовой прокатки с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «DEFORM-3D» и физического моделирования на сертифицированном оборудовании (в том числе GLEEBLE-3800) и экспериментальную проверку полученных результатов в лабораторных и промышленных условиях. Достоверность полученных результатов и выводов работы основана на использовании классических подходов механики сплошных сред и деформированного твёрдого тела, теории теплопроводности и прокатки; воспроизводимости и повторяемости результатов компьютерного моделирования на лабораторных станах, а также непротиворечивости известным работам по рассматриваемой тематике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель асимметричной тонколистовой прокатки, реализованная в программном комплексе «DEFORM-3D».
2. Результаты исследования закономерностей изменения сопротивления пластической деформации и теплофизических свойств для сталей 08Ю, 17ГС, Э3А и 0504Д.
3. Закономерности влияния параметров искусственной асимметрии при тонколистовой прокатке на изменения НДС в очаге деформации, снижение усилия прокатки, искривление полосы и формирование структуры проката.
4. Новые технологические решения, расширяющие возможности использования искусственной асимметрии при тонколистовой прокатке и обеспечивающие снижение энергосиловых параметров прокатки и получение проката с новыми свойствами.

Апробация. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и семинарах – XIV Международный конгресс прокатчиков (г. Череповец, 16–18 апреля 2024 г.); Международная молодёжная научно-техническая конференция «Magnitogorsk rolling practice» (г. Магнитогорск, 4–7 июня 2024 г., 30 мая – 3 июня 2023 г., 31 мая–4 июня 2022 г.); Перспективные машиностроительные технологии (АЕТ 2024) (г. Санкт-Петербург, 13–20 мая 2024 г.); Международная научно-практическая конференция, посвящённой 100-летию со дня рождения общенационального лидера Гейдара Алиева (Азербайджан г. Гянджа, 3–4 мая 2023 г.); Современные проблемы машиноведения (Беларусь г. Гомель, 24–25 октября 2023 г.); Металлургия столетия глазами молодых (г. Донецк, 26–27 мая 2020 г., 22 мая 2019 г., 23–24 мая 2018 г.); III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием "Современная металлургия нового тысячелетия", посвящённая 10-летию металлургического института (г. Липецк, 21–23 октября 2020 г.); XIX Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов (г. Старый Оскол, 12 мая 2022 г.); XXVII Областная научно-техническая конференция «Повышение эффективности

металлургического производства» (г. Липецк, 6 марта 2019 г.); Областной профильный семинар «Школа молодых учёных» по проблемам технических наук (г. Липецк, 17 ноября 2020 г., 15 ноября 2019 г.); Тенденции развития современной науки (г. Липецк, 20 марта – 12 мая 2023 г., 20 апреля – 10 июня 2022 г., 14–18 апреля 2018 г., 24–26 апреля 2017 г.).

Публикации. По тематике диссертации опубликованы 27 работ, в том числе 6 статьи в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК РФ и включённых в международную наукометрическую базу Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения. Список литературы содержит 141 наименование. Работа изложена на 113 страницах, содержит 71 рисунок и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлены современные технологии производства стальных полос. Проведён анализ производства стали для различных отраслей промышленности. Отмечена уникальность технологии асимметрии при горячей и холодной прокатке стали. Рассмотрено влияние различных видов асимметрии на кривизну полосы, энергосиловые параметры прокатки и структуру стали. К исследованиям в данной области относятся работы Салганика В.М., Выдрина В.Н., Королева А.А., Потапкина В.Ф., Пименова А.Ф., Нефедорова А.А., Сеницына В.Г., Песина А.М., Бельского С.М., Дыя Х.И., Кавалек А.А., и др.

Во второй главе предложена компьютерная модель прокатки с искусственной асимметрией и представлены результаты моделирования её влияния на усилие прокатки.

Разработана компьютерная модель тонколистовой прокатки, реализованная с использованием метода конечно-элементного моделирования в программном комплексе «DEFORM-3D», для расчёта напряжённо-деформированного и теплового состояния металла с учётом геометрической и скоростной асимметрии.

Определены реологические свойства сталей текущего производства НШСП 2000. Исследования реологических свойств сталей марок 08Ю, 17ГС, Э3А и 0504Д выполнены в Ченстоховском политехническом университете (г. Ченстохова, Польша) на серво-гидравлическом пластометре «Gleeble-3800». Проведение исследований осуществлялось по следующей схеме: образцы нагревали со скоростью 5°C/с до температуры 700–1100°C, далее осуществлялась выдержка в течении 15–130 секунд, затем их деформировали со скоростями деформации 0,1–100 с⁻¹, затем следовало охлаждение воздухом. Полученные в результате исследований кривые зависимости напряжения течения металла от истинной деформации использованы в модели тонколистовой прокатки. Для определения коэффициентов теплоотдачи и излучения были проведены натурные тепловые исследования. Исследование проводилось в лаборатории им. С.Л. Коцаря кафедры ОМД ЛГТУ (Липецк, Россия). От слэбов текущего производства НШСП 2000 сталей марок Э3А,

0504Д и 17ГС были отобраны темплеты и из них изготовлены образцы размером 50×70×70 мм. Образцы помещали в печь, нагретую до температуры 400 °С. Нагрев проводился ступенчато: первая ступень – 400/500°С, вторая – 900 °С, третья – 1150 °С. На каждой ступени нагрева проводилась выдержка 30 минут. После нагрева и выдержки при 1150°С образец извлекали из печи и охлаждали на открытом воздухе до температуры 400°С. Далее образец нагревали повторно, непрерывно до температуры 1150°С. Контроль температур осуществляли при помощи термопар (тип ХА): две были зачеканены на глубину 25 мм и 10 мм, третья фиксировала температуру окружающей среды на высоте 15 мм от верхней поверхности образца. Показания с термопар регистрировались с помощью 4-канального измерителя-регулятора с функцией архивирования ELHART ECD4–L. По результатам вычислительного и лабораторного эксперимента были определены коэффициенты теплоотдачи и излучения, которые легли в основу компьютерной модели промышленного нагрева металла исследуемых сталей в печи стана 2000.

Для адаптации модели к промышленным условиям, на участке нагревательных печей стана 2000 ПАО «НЛМК» был проведён промышленный эксперимент на металле текущего производства стали марки Э3А. От сляба отобран темплет (мини-сляб) размером 250×1030×1800 мм. В мини-сляб были зачеканены 6 термопар на глубину 30 мм, 65 мм и 125 мм. Седьмая термопара была расположена на высоте 50 мм от верхней поверхности мини-сляба. Мини-сляб нагревали в течении 270 минут вместе с печью до 900°С. После нагрева и выдержки при 900°С образец охлаждался вместе с печью до цеховой температуры. Результаты изменения температуры регистрировали с помощью 8-канального электронного регистратора температуры с функцией архивирования РТМ-1010. Нагрев мини-сляба был также воспроизведён на разработанной модели. По полученным результатам были скорректированы коэффициенты теплоотдачи и излучения. Сравнение результатов расчёта по тепловой модели с экспериментальными данными представлено на рисунке 1.

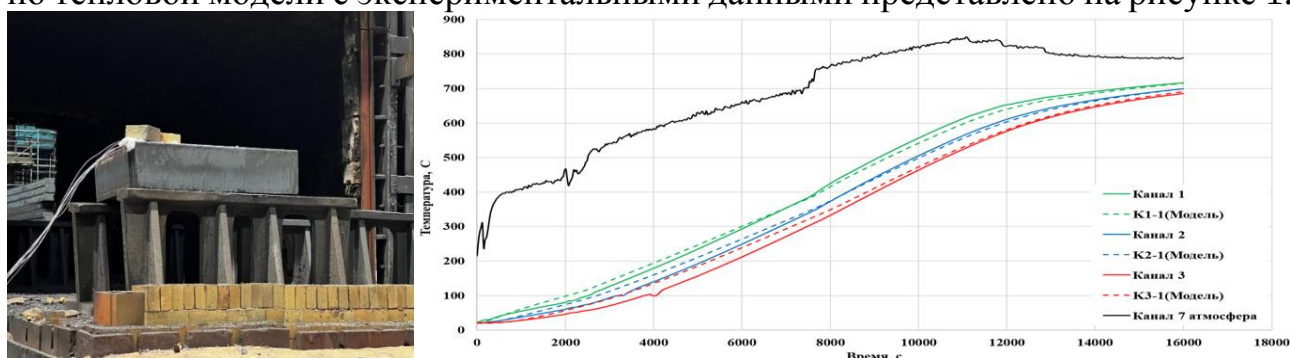


Рисунок 1 – Сравнительный анализ нагрева мини-сляба в DEFORM-3D и промышленного эксперимента

Экспериментальные данные по реологическим свойствам и теплофизические коэффициенты использованы при верификации компьютерной модели тонколистовой прокатки.

Влияния искусственной асимметрии на усилие при горячей прокатке. Для определения влияния скоростной искусственной асимметрии на усилие при горячей прокатке проведено компьютерное моделирование режимов

тонколистовой прокатки. Моделирование выполнено при коэффициентах скоростной асимметрии $A_v = 1,1-1,15$, где $A_v = V_n/V_v$ (отношение линейной скорости вращения нижнего V_n и верхнего V_v рабочих валков). Моделировалась прокатка с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм. Температура прокатки образца составляла $T = 1000^\circ\text{C}$. Значение коэффициента трения при моделировании принято 0,48. Уширение при прокатке не учитывалось. Образец представлял собой центральную часть полосы шириной 100 мм, ограниченной плоскостями симметрии. Валки абсолютно жёсткие. Диаметр рабочих валков принят 300 мм, скорость нижнего валка постоянная $n = 25$ об/мин. В качестве материала выбрана сталь повышенной прочности S355J2 (аналог 17ГС). Полученные результаты показывают снижение усилия прокатки с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм при скоростной асимметрии с коэффициентом $A_v = 1,05$ до 470 кН и $A_v = 1,15$ до 410 кН по сравнению с симметричным способом $A_v = 1,00$ (500 кН).

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния искусственной асимметрии на энергосиловые параметры, геометрию и структуру полосы при горячей прокатке.

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования проведены лабораторные эксперименты на стане ДУО 300 в Ченстоховском политехническом университете (г. Ченстохова, Польша). Двухвалковый стан оснащён линейным контролёром измерения зазора между валками ЛИР-520А-00-ПИ-5. Так же на стане установлено два редуктора РМ650 и два двигателя 4АН280М6УЗ, мощность каждого двигателя 55 кВт. Индивидуальный привод рабочих валков с максимальной чистотой вращения до 26 об/мин позволяет получить скоростную асимметрию до 1,2, скорость прокатки до 0,45 м/с. Эксперимент был выполнен для прокатки стали марки S355J2 (аналог 17ГС) с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм. Температура прокатки образцов составляла $T = 1000^\circ\text{C}$. Диаметры рабочих валков составляли 300 мм, скорость вращения верхнего рабочего валка была постоянной. Диапазон изменения коэффициента асимметрии составил 1,05 – 1,15.

Скоростная асимметрия при прокатке приводит к искривлению полосы в связи с тем, что на верхней и нижней поверхности полосы имеет разные условия деформирования. Проведён анализ изменения кривизны при горячей прокатке с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм стали марки S355J2 (аналог 17ГС) при скоростной асимметрии с коэффициентами $A_v = 1,05$ и 1,15. Установлено, что кривизна полосы увеличивается с увеличением скоростной асимметрии, что наглядно продемонстрировано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Профиль полосы при физическом моделировании с использованием скоростной асимметрии с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм
(Сверху вниз: коэффициент асимметрии увеличивается (1,00–1,15))

Сравнительный анализ результатов экспериментальных прокаток и компьютерного моделирования демонстрирует качественно одинаковый характер уменьшения усилия прокатки при скоростной асимметрии. Расчёты по компьютерной модели показывают уменьшение усилия прокатки с толщины $h_0 = 2$ мм на $h_1 = 1,4$ мм на 28%, а измеренные при экспериментальной прокатке на 26% в сравнении с традиционной схемой (рисунок 3).

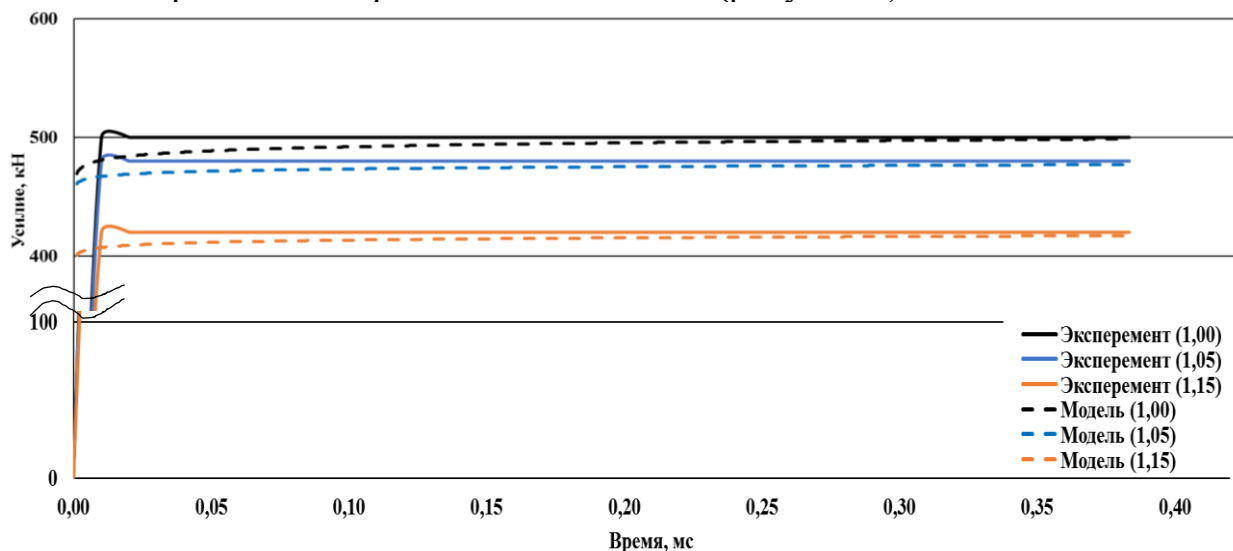


Рисунок 3 – Влияния искусственной скоростной асимметрии на усилие прокатки при физическом и компьютером моделировании с толщины $h_0 = 2$ на $h_1 = 1,4$ мм

Влияние разницы диаметров валков при горячей прокатке. В период прохождения научной стажировки в Ляонинском Университете Науки и Технологий (г. Аньшань, Китай) был спроектирован и изготовлен комплект экспериментальных валков, бочка которых имеет ступенчатое изменение диаметров. Это позволило осуществить процесс прокатки с разными коэффициентами асимметрии в диапазоне $A_v = 1,075–1,3$ без дополнительной перевалки валков. Валки устанавливали во вторую клеть лабораторного литейно-прокатного агрегата (рисунок 4). Перед началом лабораторного эксперимента рабочие валки нагревали до температуры 60°C , чтобы имитировать прокатку в чистовой группе клеток стана горячей прокатки. Эксперимент был выполнен для прокатки с толщины $h_0 = 10$ мм на $h_1 = 6$ мм на образцах размером $10 \times 20 \times 150$ мм стали марки 17ГС. Температура прокатки полосы составляла $T = 1000^\circ\text{C}$. Экспериментальные прокатки на ступенчатых валках показали уменьшение усилия прокатки с 5,5 тонн до 3,4 тонны (рисунок 5).

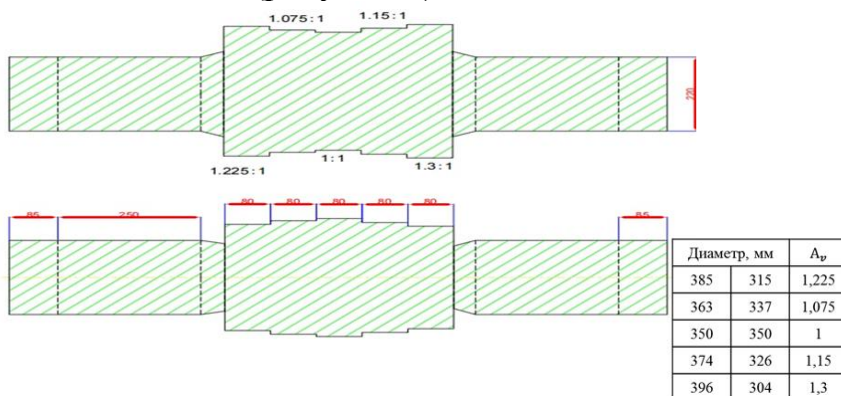


Рисунок 4 – Экспериментальные ступенчатые валки на стане 350 (г. Аньшань, Китай)

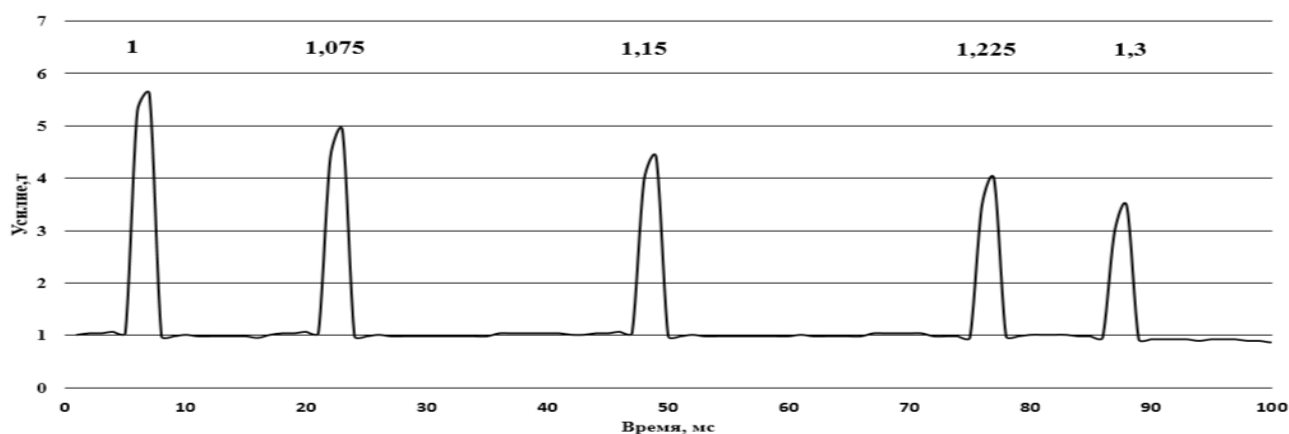


Рисунок 5 – Влияния искусственной асимметрии на усилие прокатки

*Влияние искусственной скоростной асимметрии на структуру горячекатаной полосы**. Образцы сталей марок ЭЗА нагревались в печи до температуры 1000°C и прокатывались в условиях скоростной асимметрии $A_v=1,2-1,3$ при обжатиях 50–80% с последующей закалкой для фиксации структуры. Установлено, что средний размер зерна в образце составляет 5,5 мкм или 8,1 мкм по средневзвешенному. При этом количество зёрен с текстурой Госсса составляет 0,04%, а γ -волокна 6,99% (угол разориентировки 70° в обоих случаях).

Одной из причин формирования мелкой структуры является, в том числе, и увеличение интенсивности деформации, что наглядно продемонстрировано на компьютерной модели в главе 3. Косвенным признаком увеличения интенсивности деформации в очаге деформации является повышение температуры металла. Для исследования эффекта деформационного разогрева проведён эксперимент по измерению температуры в очаге деформации при горячей прокатке.

Эксперимент проведён на реверсивном стане ДУО 180 в лаборатории им. С.Л. Коцаря кафедры ОМД ЛГТУ (Липецк, Россия). Исследования проводили для трёх режимов: 1. Двухвалковый режим №1 с диаметрами рабочих валков 180/180 мм ($A_v=1,0$); 2. Двухвалковый режим №2 с диаметрами рабочих валков 180/120 мм ($A_v=1,5$); 3. Трёхвалковый режим №3 с диаметрами рабочих валков 180/60/180 мм ($A_v=3,0$). Прокатка осуществлялась с толщины $h_0=10$ мм на $h_1=2$ мм и $h_0=10$ мм на $h_1=5$ мм в три прохода. Исследуемые стали марки 17ГС, ЭЗА, исходный размер образцов 10×10×200 мм. В центральное сечение образцов была зачеканена термопара (типа ХА). Температуру регистрировали с помощью 4-канального двухмодульного расширителя DVP04TC-S. При горячей прокате на лабораторном стане разогрев в очаге деформаций по режиму №1 составил 3°C, по режиму №2 ровно 11°C по режиму №3 было 13°C. Проведённый эксперимент подтверждает достоверность увеличения интенсивности деформации при использовании искусственной асимметрии при прочих равных условиях.

В четвертой главе исследовано влияние искусственной асимметрии при тонколистовой холодной прокатке.

*Металлографические исследования выполнены к.т.н Щеренковой И.С. и Ореховой Ю. Н.

По аналогии с результатами, представленными во 2 и 3 главах, выполнено моделирование холодной прокатки при коэффициентах скоростной искусственной асимметрии $A_v = 1,1-1,2$. Значение коэффициента трения при моделировании было принято 0,028. Моделирование осуществлялось также без учёта уширения. Модельный образец размером $2 \times 100 \times 200$ мм представлял собой центральную часть полосы шириной 100 мм, ограниченной плоскостями симметрии. Диаметр рабочих валков составлял 360 мм и скорость нижнего валка принята постоянной $n=60$ об/мин. Обжатия принимали по фактическим режимам четырёхклетевого стана холодной прокатки для электротехнических сталей марки Э3А. Прокатка осуществлялась в 4 прохода на конечную толщину 0,7 мм. Полученные результаты показывают снижение усилия прокатки при введении скоростной асимметрии (таблица 1).

Таблица 1 – Энергосиловые параметры прокатки стали марки Э3А

Сталь Э3А (DEFORM-3D)					
Обжатие, %		40	30	20	10
$A_v = 1,0$	Усилие, Н	490820	462564	410247	409548
$A_v = 1,1$		475842	428542	405846	395248
$A_v = 1,2$		427861	387294	347289	315421

Экспериментальные исследования проводили на лабораторно-промышленном стане ДУО 360 листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов имени А. П. Жилиева МГТУ им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, Россия), оснащённого месдозами, установленными под подушками нижнего рабочего валка. Образцы, исходным размером $2 \times 100 \times 200$ мм из сталей марки Э3А, 0504Д и 08Ю, прокатывали с обжатием 10–40% и коэффициентом скоростной асимметрии $A_v = 1,1-1,2$. Прокатка осуществлялась в 4 прохода. Фактические значения обжатия на проход назначались по параметрам, рассчитанным ранее на компьютерной модели. Образцы из стали марки 0504Д предварительно подогревали до 100°C . Полученные результаты свидетельствуют о снижении усилия холодной прокатки на до 30% (таблица 2–4).

Таблица 2 – Энергосиловые параметры прокатки стали марки 08Ю

Сталь 08Ю (эксперимент)					
Обжатие, %		40	30	20	10
$A_v = 1,0$	Усилие, Н	284393	264780	245166	225845
$A_v = 1,1$		269683	245166	235553	210746
$A_v = 1,2$		250780	234973	226468	205553

Таблица 3 – Энергосиловые параметры прокатки стали марки Э3А

Сталь Э3А (эксперимент)					
Обжатие, %		40	30	20	10
$A_v = 1,0$	Усилие, Н	586575	578592	549172	539366
$A_v = 1,1$		559752	519752	509946	470719
$A_v = 1,2$		460913	451106	421237	382459

Таблица 4 – Энергосиловые параметры прокатки стали марки 0504Д

Сталь 0504Д (эксперимент)					
Обжатие, %		40	30	20	10
$A_v = 1,0$	Усилие, Н	470913	411299	401879	382459
$A_v = 1,1$		451686	382459	372653	362653
$A_v = 1,2$		411686	372653	363846	343813

В пятой главе представлены рекомендации по использованию искусственной асимметрии на существующих станах горячей и холодной прокатки.

Для стана 2000 ПАО «НЛМК» возможным вариантом реализации асимметричной прокатки является подбор валков с разными диаметрами, так как привод рабочих валков осуществляется через шестерённую клеть. Для рассмотрения возможности использования асимметрии на стане была разработана математическая модель, основанная на методиках С. Экелунда и А.И. Целикова. Результаты расчёта энергосиловых и температурно-скоростных параметров прокатки при использовании рабочих валков с разностью диаметров согласно технологической инструкции 910–760 мм демонстрируют возможность снизить усилие прокатки до 9% на текущем сортаменте. При этом привода главных линий чистовой группы клетей не превысят допустимых значений по мощности.

Для применения искусственной асимметрии на непрерывном стане 1400 ПАО «НЛМК» возможным вариантом видится использование отличных друг от друга скоростей верхнего и нижнего рабочих валков, так как клетки оснащены индивидуальными приводами. Результаты расчёта энергосиловых параметров холодной прокатки, основанного на методике С.Л. Коцаря, полученные для текущего сортамента стана 1400, позволяют сделать вывод о том, что может быть достигнуто снижение усилия прокатки до 8%.

В целом результаты компьютерного моделирования и лабораторных прокаток свидетельствуют об эффективности использования искусственной асимметрии при тонколистовой прокатке для снижения усилия прокатки и производства проката с новыми свойствами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертации с использованием современных методов компьютерного и физического моделирования, а также результатов экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях изложены новые научно обоснованные технологические решения по использованию искусственной асимметрии в производстве тонколистового проката, расширяющие область применения искусственной асимметрии и обеспечивающие снижение энергосиловых параметров прокатки и получение проката с новыми свойствами. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Определены лабораторно реологические свойства и уточнены в промышленных условиях теплофизические характеристики для сталей марок 17ГС, Э3А и 0504Д, которые использованы в разработанной компьютерной модели тонколистовой прокатки с искусственной асимметрией, связанной с геометрическими и/или скоростными параметрами рабочих валков. Компьютерная модель реализована в ПК «DEFORM-3D». Моделирование продемонстрировало снижение усилия при горячей прокатке для этих марок сталей на 15–28%, а экспериментальные прокатки на тех же условиях на 13–26% при асимметрии. При холодной прокатке сталей марок Э3А, 0504Д и 08Ю

в лабораторных условиях усилие снизилось на 30%, 13% и 12%, соответственно, по сравнению с симметричным способом прокатки стали. При этом значения суммарной мощности прокатки, с учётом перераспределения между верхним и нижним рабочими валками, изменяется незначительно.

2. Установлено, что искривление полосы, вызванное асимметрией, позволяет вести процесс горячей прокатки устойчиво, без застревания головной части полосы в клети при использовании коэффициента скоростной асимметрии $A_v=1,15$. Компьютерное моделирование холодной прокатки показало, что при изменении асимметрии в диапазоне $A_v=1-1,2$ и обжати 10–40% кривизна меняется в диапазоне 1–1,5 1/м. Для исключения потери устойчивости процесса холодной прокатки целесообразно применять скоростную асимметрию с коэффициентом $A_v=1,2$.

3. Анализ влияния асимметрии на структуру горячекатаной полосы показал, что в условиях скоростной асимметрии $A_v=1,3$ возможно получение среднего размера зерна 5,5 мкм для стали марки Э3А. Доказано, что формирование мелкой структуры способствует увеличению интенсивности деформации в процессе прокатки. Увеличение интенсивности деформации подтверждено компьютерным моделированием, а также экспериментально за счёт дополнительного деформационного разогрева металла в очаге деформации на 11°C и 13°C при коэффициентах асимметрии $A_v=1,5$ и 3, соответственно, против 3°C при $A_v=1$, при прочих равных условиях.

4. На основе расчёта энергосиловых и температурно-скоростных параметров (методика С. Экелунда и А.И. Целикова) разработана рекомендация для стана горячей прокатки 2000 ПАО «НЛМК» по использованию асимметрии с разными диаметрами рабочих валков в диапазоне 910–760 мм. Показана возможность снижения усилия прокатки на текущем сортаменте до 9%. Расчёт энергосиловых параметров холодной прокатки (методика С.Л. Коцаря) продемонстрировал снижение усилия прокатки на текущем сортаменте до 8% с использованием искусственной асимметрии. По результатам анализа предложено использовать скоростную асимметрию в диапазоне $A_v=1,15-1,2$ для стана порулонной холодной прокатки 1400 ПАО «НЛМК», который имеет индивидуальные привода в главных линиях клети. При этом допустимые значения по мощности в приводах главных линий клетей не будут превышены.

5. Полученные в работе результаты и рекомендации переданы в Дирекцию по разработке новых технологий процесса ПАО «НЛМК», а также использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «ЛГТУ».

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях:

1. Исследование влияния асимметрии на энергосиловые параметры при холодной прокатке / К. С. Горбунов, Л. В. Носов, И. П. Мазур // Черные металлы. – 2024. – № 7. – С. 52-55. – DOI 10.17580/chm.2024.07.08 (ВАК / Scopus)
2. Физическое и компьютерное моделирование влияния асимметрии на силу при горячей прокатке стали повышенной прочности / К. С. Горбунов, А. С.

Абросимов, К. В. Бахаев, И. П. Мазур // Заготовительные производства в машиностроении. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 271-274. – DOI 10.36652/1684-1107-2024-22-6-271-274 (БАК)

3. Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке / К. С. Горбунов, И. С. Щеренкова, Ю. Н. Орехова, И. П. Мазур // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 54-66. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66. (БАК)
4. Анализ влияния условий и величины деформации на деформируемость прутков из сплава AZ31 на стане радиально-сдвиговой прокатки / Т. Баер, Х. Дыя, А. Грыц, К.В. Бахаев, К.С. Горбунов, И.П. Мазур // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 372-380. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-372-380 (БАК)
5. Влияние коэффициента скоростной асимметрии на энергосиловые параметры и изгиб полосы / А. А. Кавалек, Х. И. Дыя, К. В. Бахаев, К. С. Горбунов // Черные металлы. – 2021. – № 10. – С. 31-34. – DOI 10.17580/chm.2021.10.05. (БАК / Scopus)
6. Исследование теплового состояния металла с использованием методов физического и математического моделирования / А. Г. Левыкина, К. С. Горбунов, А. И. Позднякова, В. Н. Соловьев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 102-108. – DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108. (БАК)

Прочие Публикации:

7. Асимметричная прокатка низкоуглеродистых сталей / Горбунов К.С., Мазур И.П. / В сборнике: Перспективные машиностроительные технологии. Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвящённой 125-летию Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и 5-летию Высшей школы машиностроения. Санкт-Петербург, 2024. С. 435-439.
8. Использование асимметрии при производстве листового проката / Горбунов К.С., Черный В.А., Мазур И.П. / В сборнике: Dördüncü sənaye inqilabı və innovativ texnologiyalar. Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr olunmuş, mövzusunda Beynəlxalq elmi-praktik konfransın materialları. Təqkilat Komitəsinin sədri Yaşar Ömərov Sədr Müavini Mayis Gülləliyev. 2023. С. 55-56.
9. Looking at the deformation zone temperature during hot rolling /Gorbunov K.S., Levykina A.G., Mazur I.P. / В книге: Magnitogorsk Rolling Practice 2023. Proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference. Magnitogorsk, 2023. С. 88-90.
10. Влияние скоростной асимметрии на структуру металла / Горбунов К.С., Позднякова А.И., Мазур И.П. / В сборнике: Современные проблемы машиноведения. Сборник научных трудов. В 2-х частях. Под общей редакцией А.А. Бойко. Гомель, 2023. С. 29-31.

11. Effect of asymmetric rolling on flatness of sheet products / Gorbunov K.S., Cherny V.A., Mazur I.P. / В книге: Magnitogorsk Rolling Practice 2022. Proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference. Magnitogorsk, 2022. С. 10-12.
12. Преимущества асимметричной прокатки /Горбунов К.С. /В книге: "Школа молодых учёных" по проблемам технических наук. Материалы областного профильного семинара. Липецк, 2020. С. 47-49.
13. Исследование асимметричного процесса прокатки на стане 2000 ПАО «НЛМК» Горбунов К.С., Бахаев К.В. / В сборнике: Современная металлургия нового тысячелетия. Сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Липецк, 2020. С. 112-116.
14. Асимметричный процесс прокатки/ Горбунов К.С., Бахаев К.В. / В сборнике: Металлургия XXI столетия глазами молодых. Сборник докладов V международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов. Отв. ред. Кочура В.В., 2019.
15. Асимметричная прокатка / Горбунов К.С., Бахаев К.В. В книге: Повышение эффективности металлургического производства. Сборник материалов XXVII областной научно-технической конференции. 2019. С. 140-143.
16. Система контроля геометрических параметров горячекатаных полос / Горбунов К.С., Астахов А.А., Мухин Ю.А. В книге: Тенденции развития современной науки. Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2 частях. 2017. С. 194-197.