

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доктор экономических наук, профессор

И.А. Дроговоз

« 3 »

2023

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Болобановой Наталии Леонидовны на тему: «Совершенствование технологии производства стального листового проката на основе повышения эффективности его формообразования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением

1. Актуальность диссертационного исследования

С повышением темпов развития машиностроения и других отраслей промышленности, использующих лазерную или плазменную обработки, особую актуальность приобретает получение геометрии проката, соответствующей высшему мировому уровню. При этом требуется уменьшать поперечную разнотолщинность широких стальных полос и обеспечивать минимальное отклонение деталей от плоскостности после лазерной или плазменной резки. Такие высокие конкурентные качества достигаются совершенствованием технологий производства стального листового проката, главным образом, за счет повышения эффективности его формообразования.

Весьма важным является дальнейшее изучение закономерностей взаимосвязи и взаимообусловленности факторов формообразования. При этом важно решение проблем снижения расходного коэффициента металла и прокатных валков, обеспечения бесперебойной работы оборудования и одновременного увеличения объемов производства.

2. Объем, структура и содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 299 страницах, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 286 источников и приложения. Диссертация содержит 128 рисунков и 34 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, описаны подходы и методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ современного состояния и перспективных направлений исследований формообразования листового проката на этапах производства от прокатки сляба до правки проката на роликовых правильных машинах.

Отмечено, что определяющий вклад в развитие методов описания формообразования листового проката при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках внесли известные работы И.М. Павлова, А.И. Целикова, М.М. Сафьяна, А.М. Мелешко, В.В. Мельцера, Г.Э. Аркулиса, П.И. Полухина, Р.Л. Шаталова, В.М. Салганика, И.П. Шабалова, А.М. Песина,

И.П. Мазура.

Получение высококачественной листовой металлопродукции, конкурентной по геометрическим показателям, определяется технологической возможностью уменьшения неравномерности распределения упругих деформаций прокатных валков по длине бочки в контакте с полосой под действием нестабильных факторов технологии. Ранее вопрос обеспечения высокой плоскостности широких листов при их дальнейшей резке лазером или плазмой за счет разработки технологических режимов обработки стальной полосы при ее производстве на металлургических предприятиях не решался. Вопросы разработки технологии правки широкого горячекатаного листового проката с обеспечением пригодности для высокотехнологичной обработки в настоящее время не решены и требуется дальнейшее развитие исследований в этом направлении.

Во второй главе описана реализация модели процесса прокатки сляба в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки на основе применения программного комплекса конечно-элементного моделирования DEFORM-3D и представлены результаты исследований формообразования раската.

Адекватность моделирования оценивалась путем сравнения измеренных в клетях черновой группы стана 2000 и рассчитанных параметров формоизменения. Расхождения между расчетными и измеренными величинами толщины и ширины раската не превысили 4 %. При этом средние значения погрешности расчета усилия прокатки в клетях не превысили 11 %. То есть реализация конечно-элементного моделирования с достаточной точностью определяет формоизменение раската в клетях черновой группы и может быть использована для оценки величины смещения металла с узких граней раската на широкие.

Выполненные численные исследования показали, что величина перехода металла с узкой грани на широкую определяется только степенью деформации в горизонтальных валках, распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на перемещение металла не оказывает.

Установлено, что выполнение на боковых ребрах сляба равнобедренных скосов размером, равным разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной полосы, существенно ограничивает переход металла с узкой грани на широкую. В этом случае величина затекания уменьшается в 2,5 раза и не превышает 15 мм.

В третьей главе с использованием метода конечных элементов решены задачи моделирования формообразования поперечного профиля листового проката и профилирования валков листопрокатного производства.

Для определения упругих деформаций выполнено моделирование трехмерной валковой системы кварто в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus. Окончательный поперечный профиль получен геометрическим суммированием кривых упругих деформаций с кривыми износа и теплового расширения валков.

Моделирование формообразования поперечного профиля листового проката было выполнено для различных непрерывных широкополосных станов холодной прокатки 1700 и 2100, горячей прокатки 2000, а также толстолистового стана 5000. Сравнение результатов расчета и измерений показало, что погрешности расчета находятся в диапазоне 3–6 %.

Выполненные теоретические и промышленные исследования позволили создать методику выбора профилировок валков, учитывающую взаимосвязь между различными влияющими факторами и интегрирующую описанный метод моделирования формообразования поперечного профиля. На основе разработанной методики профилирования прокатных валков были выполнены исследования и разработки

профилировок валков с оценкой их влияния на формирование поперечного профиля прокатываемых полос и листов, а также стойкость валков.

Автором определено, что диапазон осевой сдвижки рабочих валков с асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками позволяет уменьшать разность упругих деформаций на ширине полосы не менее чем на 30 %, гидравлическим изгибом обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы.

В работе также установлено, что для существенного уменьшения опасных пиковых значений напряжений в межвалковом контакте и повышения стойкости опорных валков следует отказаться от скосов на бочке опорного валка и выполнить профиль бочки выпуклым из отрезков парабол, плавно сопрягающихся между собой и с торцом бочки. Новизна разработанного на этой базе технического решения подтверждена патентом РФ на изобретение.

В четвертой главе разработан новый научный подход к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков, определяющих работоспособность рабочих.

На основе выполненных теоретических и промышленных исследований деформационного упрочнения и износа опорных валков созданы алгоритмы оценки состояния поверхности рабочего слоя их бочек при прокатке.

Предложено решение по определению величины съема рабочего слоя, имеющего значительные усталостные нагрузки, и гарантированному увеличению наработки рабочего слоя опорного валка не менее чем на 10 %, а также обеспечению снижения расхода опорных валков в 1,2 раза. Новизна решения подтверждена патентом РФ на изобретение.

В пятой главе представлены результаты комплексного расширенного исследования возможностей воздействия на горячекатаный листовой прокат при правке на роликовой правильной машине, которые позволят обеспечить высокую плоскостность получаемых деталей при раскрое листов по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки.

Диссертантом разработана математическая модель, позволяющая выдавать практические рекомендации по эффективности процесса правки на основе оценки влияния числа роликов, диаметров роликов, толщины полосы и ее материала на коэффициент проникновения пластической деформации по толщине. С использованием данной модели были разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии правки и модернизации действующих линий поперечной резки металла, установленных в цехе отделки металла № 2 ПАО «Северсталь».

В шестой главе приведены результаты внедрения новых технических и технологических решений, направленных на достижение высоких показателей качества широких стальных полос, стойкости валков и экономии материальных ресурсов.

Внедрены разработанные решения по уменьшению величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины. Это позволило снизить отсортировку металла, предназначенного для производства холоднокатаного проката шириной 1350–1600 мм, с 3,28 % до 1,87 %.

Внедрены в производство новых профилировок валков: на четырехклетевом стане холодной прокатки 2100; на пятой клетки непрерывного широкополосного стана холодной прокатки 1700; рабочих валков чистовой группы стана 2000 и исполнены скосы на краю бочки опорных валков.

Апробированы и внедрены решения рациональной эксплуатации валков, определяющих процесс формообразования широких стальных полос при прокатке.

Внедрены новые режимы правки горячекатаного листового проката, предназначенного для дальнейшей высокотехнологичной резки.

В приложении приведена справка об экономическом эффекте.

3. Научная новизна исследования

1. Установлено, что уменьшение перехода металла с узкой грани на широкую определяется только степенью деформации в горизонтальных валках, распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на перемещение металла не оказывает. Выполнение на боковых ребрах сляба равносторонних скосов размером, равным разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной полосы величина затекания точек скосов узкой грани сляба уменьшается в 2,5 раза.

2. Разработана новая методика эффективного профилирования валков, основанная на применении пространственной конечно-элементной модели. Методика включает определение поперечного профиля листового проката на основе геометрического суммирования кривых упругих деформаций, профиля износа валков, теплового профиля и поиск профилировок валков с учетом исходной неплоскостности проката и возможностей регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба. Показано, что методика профилирования валков обеспечивает значение поперечной разнотолщинности широких полос не более 2 % от номинальной толщины без снижения стойкости валков.

3. Разработан новый научный подход к оценке параметров состояния листопрокатных валков непрерывного стана. Показано, что определяющей характеристикой состояния опорного валка является деформационное упрочнение его бочки после прокатки. Получена зависимость приращения твердости рабочего слоя бочки валка i -ой клетки чистовой группы от длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки. Разработан новый способ определения величины съема при шлифовке опорного валка, основанный на учете роста приращения твердости бочки валка в 1,2–1,9 раза в клетях по ходу прокатки.

4. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований процесса холодной правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации раскрыт механизм взаимосвязи технологических режимов правки и отклонений листового металла при последующей плазменной или лазерной резке. Выявлено, что уровень пластических деформаций в начале процесса правки не менее 90 % по толщине полосы гарантированно исключает искривление листов при резке и минимизирует влияние остаточных напряжений и накопленной потенциальной энергии упругих деформаций после правки.

4. Практическая значимость результатов работы

1. Предложены решения по усовершенствованию технологии прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000, направленные на ограничение смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины и минимизацию величины обрезки кромок полос.

2. Разработаны и внедрены в производство профилировки валков непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки, обеспечивающие эффективное воздействие на поперечный профиль полосы и повышение стойкости валков.

3. Разработаны новые способы, направленные на повышение эксплуатационной стойкости опорных валков при производстве широких стальных полос и листов, на увеличение наработки рабочего слоя опорных валков без роста степени наклепа и износа

бочки с обеспечением снижения расхода валков. Новизна технических решений подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения № 2585594 и № 2795664, а также свидетельством о регистрации государственной программы для ЭВМ.

4. Разработан комплекс методик и алгоритмов для: определения величины съема при шлифовке опорных валков чистовой группы за прокатную кампанию по клетям непрерывного широкополосного стана 2000 ПАО «Северсталь»; прогнозирования величины износа и приращения твердости бочки опорных валков по клетям чистовой группы стана 2000 за прокатную кампанию.

Подготовлены практические рекомендации по периодичности перевалки опорных валков чистовой и черновой групп непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, направленные на увеличение объема производства на стане и снижение производственных затрат, связанных с эксплуатацией валков.

5. Разработаны, испытаны и внедрены технологические режимы правки на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки № 3 и № 4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь», обеспечивающие получение проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

6. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технических и технологических решений, полученных по результатам работы, в условиях действующего промышленного производства составляет более 26 млн руб. в год.

7. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе и при проведении научно-исследовательской работы студентов по направлению подготовки «Металлургия» в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

5. Подтверждение опубликованных основных результатов в научной печати и соответствия содержания автореферата основным положениям диссертации

По тематике диссертации опубликовано 39 научных работ, в том числе 2 монографии, 16 статей в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в международной наукометрической базе Web of Science и Scopus, 2-х патентах на изобретение Российской Федерации и одном свидетельстве на регистрацию программы для ЭВМ. Выпущено 1 учебное пособие. Материалы диссертации доложены и обсуждены на 14 международных научных конференциях и семинарах.

Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

6. Обоснованность и достоверность научных результатов

Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования основана на применении математического описания, базирующегося на современных достижениях в области теории обработки металлов давлением, статистической обработке данных, подтверждается комплексом исследований и экспериментов на действующих толстолистовом и широкополосном станах горячей прокатки, непрерывных станах холодной прокатки, различных роликовых правильных машинах и обеспечивается соответствием результатов теоретических исследований промышленным экспериментам.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы применимы к совершенствованию процессов листопрокатного производства в направлении повышения эффективности формообразования

широких стальных полос и листов, достижению высоких показателей качества продукции, повышению стойкости валков и экономии материальных ресурсов при производстве проката на ПАО «Северсталь», ПАО НЛМК, ПАО ММК, АО «Уральская сталь».

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе в профильных вузах, реализующих образовательные программы подготовки бакалавров и магистров по направлениям «Машиностроение» и «Металлургия», а также аспирантов по специальностям 2.6.4. Обработка металлов давлением и 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

8. Замечания по диссертационной работе

1. При исследовании формообразования раската в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана, не рассмотрен вопрос формирования ширины горячекатаных полос при непрерывной прокатке.

2. Автором недостаточно учтены и проработаны вопросы выбора той или иной системы профилировок валков для вновь проектируемых или полностью модернизируемых станов.

3. В разработанном новом подходе к оценке состояния бочки опорных валков при непрерывной прокатке широкой стальной полосы не приводится оценка состояния бочки рабочих валков, хотя вопросы повышения их стойкости и снижения расхода не менее важны в процессах формообразования стального листового проката.

4. В результатах расчета напряженного состояния опорного валка на контакте с рабочим валком не приведены значения касательных напряжений.

5. При исследовании процесса правки на роликовой правильной машине не исследован вопрос изменения величины радиуса полосы под каждым роликом, а значит и изменение кривизны полосы в процессе правки, определяющей уровень проникновения пластических деформаций по толщине, а также до конца не раскрыто влияние скорости процесса правки.

6. При внедрении решений по повышению эффективности формообразования листового проката не приводятся конкретные рекомендации по управлению процессами формообразования, например по осевому перемещению выпукло-вогнутых рабочих валков, их гидроизгибу и другим параметрам воздействия.

Указанные замечания имеют частный характер и не снижают положительную оценку диссертационного исследования в целом, ее научной и практической значимости.

9. Заключение

Диссертационная работа Болобановой Н.Л. на тему «Совершенствование технологии производства стального листового проката на основе повышения эффективности его формообразования» является законченной научно-квалификационной работой, в которой за счет проведенных автором комплекса исследований решены актуальные задачи: исследования закономерностей формоизменения металла при горячей прокатке сляба в горизонтальных и вертикальных валках широкополосного стана и перемещения поверхностных дефектов металла от кромок раската; исследование формообразования поперечного профиля листового проката при горячей и холодной прокатке и разработка методики выбора и расчета профилировок валков для повышения точности формирования профиля прокатываемых полос и листов и стойкости валковых систем; разработка нового научного подхода к анализу и оценке параметров состояния рабочего слоя валков непрерывных прокатных станов и увеличения их стойкости; комплексное исследование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной

деформации для расширения возможностей воздействия на листовой прокат и обеспечения высокой плоскостности получаемых деталей при раскрое на установках лазерной или плазменной резки.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением в части областей исследования – 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».

В целом диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор – Болобанова Наталия Леонидовна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением.

Диссертационная работа Болобановой Наталии Леонидовны и отзыв на нее обсуждены на заседании кафедры «Оборудование и технологии прокатки» (протокол № 3 от 18.10.2023 г.). Проект отзыва подготовлен профессором кафедры «Оборудование и технологии прокатки», доктором технических наук, доцентом Алдуниным Анатолием Васильевичем (научная специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением).

Заведующий кафедрой «Оборудование и технологии прокатки»,
доктор технических наук, профессор,
(научная специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением)

 Колесников Александр Григорьевич

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Сокращенное наименование организации	МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	Россия, 105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
Телефон	+7 (499) 263 63 91
Адрес электронной почты	bauman@bmstu.ru
Сайт организации	https://bmstu.ru/
Руководитель	к.т.н., доцент Гордин Михаил Валерьевич