

На правах рукописи



КОТОВ Кирилл Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ
ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ
ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

- Научный руководитель - кандидат технических наук
Болобанова Наталия Леонидовна
- Официальные оппоненты - **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Обработка материалов давлением и
аддитивные технологии» Московского
политехнического университета
- **Ионов Сергей Михайлович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Обработка металлов давлением»
национального исследовательского
технологического университета «Московский
институт стали и сплавов»
- Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»
(Национальный исследовательский университет)

Защита диссертации состоится 22 апреля 2020 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д.49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Калашников И.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Горячекатаный стальной листовой прокат остается одним из видов сортамента черной металлургии, на который сохраняется большой спрос в различных отраслях машиностроения и строительной индустрии. Одновременно с ростом потребления горячекатаной листовой стали непрерывно повышаются требования к ее качественным показателям. Одним из показателей, определяющих более высокий уровень технологических и потребительских свойств листового проката, является его улучшенная плоскостность, при этом ужесточение требований может возрастать в 2 – 3 раза от значений отклонений от плоскостности, представленных в стандартах. Наряду с этим требуется обеспечивать сохранение высокой плоскостности и после переработки горячекатаного проката высокотехнологичными методами, например методом лазерной или плазменной обработки.

Практика показала, что листы, изготовленные на металлургических предприятиях без отклонений от плоскостности, при выкройке из них деталей по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки из-за наличия в металле остаточных напряжений теряют плоскостность и искривляются. Поскольку основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ) в условиях циклической знакопеременной деформации, то исследование закономерностей распределения остаточных напряжений по толщине проката от величины деформации при правке с обеспечением высокой плоскостности после обработки высокотехнологичными методами имеет большое научное и практическое значение. Кроме того, исследования в этом направлении позволят существенно расширить методы диагностики текущего состояния продукции металлургических предприятий.

В подавляющем большинстве методов исследования знакопеременного деформирования тонкого стального проката рассматриваются вопросы определения кривизны проката, энергосиловых параметров и максимальных напряжений, возникающих при правке, а вопросы исследования закономерностей изменения параметров напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке с обеспечением минимальных отклонений остаточных напряжений по толщине после правки с учетом упругой разгрузки и дальнейшей обработки металла вообще не рассматриваются. Все это обуславливает актуальность моделирования и исследования процесса циклического знакопеременного нагружения в машинах для правки с установлением взаимосвязи распределения остаточных напряжений по толщине металла от технологических параметров процесса и последующей высокотехнологичной обработки. Такой подход ранее не применялся.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования в диссертации является горячекатаная стальная полоса. Предмет исследования – механизмы формирования внутренних напряжений и снижения неоднородности распределения напряжений

горячекатаных полос при правке в условиях циклической знакопеременной деформации.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации на основе моделирования и исследования факторов технологии для повышения плоскостности листов при их дальнейшей обработке.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать новую математическую модель процесса правки горячекатаной полосы на РПМ в условиях знакопеременного деформирования.
2. На основе математического моделирования исследовать механизм возникновения остаточных напряжений при правке.
3. Исследовать влияние конструктивных и технологических параметров процесса правки на показатели напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке и после правки с учетом упругой разгрузки металла.
4. Разработать методику выбора технологических режимов правки горячекатаных полос, обеспечивающих устранение исходного неоднородного напряженного состояния полос и получение минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.
5. Разработать режимы правки горячекатаных полос на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки № 3 (АПР-3) и № 4 (АПР-4) цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь».
6. Опробовать и внедрить в производство усовершенствованную технологию правки горячекатаных полос для получения проката, пригодного для лазерной резки.

Научная новизна работы.

1. На основе моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации получено, что:

- механизм возникновения остаточных напряжений обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке;
- после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

2. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивают уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

3. Разработана научно обоснованная методика выбора режима правки, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов, отличающаяся от известных учетом неоднородности напряженно-деформированного состояния проката при правке.

Практическая значимость.

1. Разработаны рекомендации по настройке роликовых правильных машин, позволяющие уменьшить остаточные напряжения в листах после правки, путем управления напряженно-деформированным состоянием металла при прохождении его через ролики.

2. 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 получения проката для лазерной резки. Годовой экономический эффект от реализации проката толщиной 4 мм со знаком «Laser Quality Steel» может составить около 6 млн. рублей.

3. Выполнена оценка конструктивных параметров роликовых правильных машин по снижению перепада напряжений по толщине при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм и даны рекомендации по установке в линию АПР-3 ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19.

Методы исследований и достоверность результатов.

Исследование механических свойств материала стальных горячекатаных полос при циклическом нагружении проводилось по стандартным методикам с использованием универсальных испытательных машин Galdabini Quasar 50 и Zwick/Roell HA250. Для теоретического исследования процесса правки металла в работе применялись программные комплексы DEFORM и SIMULIA Abaqus. На основе промышленного эксперимента определялись отклонения листов от плоскостности после правки и резки на установках плазменной и лазерной резки.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных методов с использованием современного оборудования и подтверждалась соответствием результатов теоретических исследований лабораторным и промышленным экспериментам.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты комплексного исследования процесса правки, позволившего выявить качественно новые закономерности формирования и снижения остаточных напряжений при правке на роликовых правильных машинах во взаимосвязи с последующей высокотехнологичной обработкой.

2. Методика выбора режима правки, обеспечивающая расширение возможностей процесса правки на РПМ и получение горячекатаных листов с минимальным уровнем остаточных напряжений и потенциальной энергии, пригодных для плазменной и лазерной резки.

3. Результаты опробования и внедрения методики и разработанных на ее основе технологических режимов правки в производство.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач исследований, в получении научных результатов, в самостоятельном проведении лабораторных исследований и участии в промышленных экспериментах в рамках выполнения НИОКР «Разработка специальных методов и режимов правки проката для лазерной резки в условиях ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь» с целью обеспечения его плоскостности».

Апробация диссертации.

Материалы диссертации докладывались на Международной конференции «Science in the age of experience» (г. Чикаго, США, 2017 г.); Международной конференции STEELSIM 2017 – 7th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (г. Циндао, Китай, 2017 г.); Международной конференции NUMISHEET 2018 – 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (г. Токио, Япония, 2018 г.); Международной конференции «Инженерные системы» (г. Москва, 2016 г., 2017 г. и 2018 г.); III и IV Международных научно-технических конференциях «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, 2017 г. и 2019 г.); Всероссийской научной конференции «Череповецкие научные чтения – 2017» (г. Череповец, 2017 г.).

Публикации.

Основные положения диссертации изложены в 9 печатных работах, из которых 3 статьи опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК, 1 статья – в научном журнале, индексируемом в базе данных Scopus и 2 статьи – в научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 95 наименований, и приложения, изложена на 139 страницах и содержит 78 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации.

В первой главе рассмотрены вопросы повышения плоскостности горячекатаных стальных полос и способы их правки в трех типах правильных машин: роликовой правильной машине, изгибо-растяжной машине и растяжной машине. Анализ применяемых способов правки показал, что при правке полос широкого сортамента с высокой производительностью многократный знакопеременный изгиб в РПМ несомненно был и останется одним из самых востребованных способов правки, а решение проблем настройки и выбора оптимальных режимов правки с учетом конструктивных возможностей даст широкие перспективы технологии правки стальных полос на роликовых правильных машинах.

Анализ существующих моделей расчета параметров процесса правки полос на РПМ показал, что вопросами моделирования процесса правки занимается достаточно большое число исследователей, как в России, так и в мире. В зарубежной литературе при исследовании знакопеременного изгиба предпочтение отдается использованию метода конечных элементов. Однако механизм формирования остаточных напряжений при знакопеременном деформационном воздействии на полосу, зависящий от большого числа технологических и конструктивных параметров РПМ и характеристик исходной полосы, не раскрыт. Кроме того, обзор научно-технических публикаций показал, что отсутствует комплексный подход к прогнозированию остаточных напряжений в стальных листах при знакопеременном нагружении и последующей высокотехнологичной обработке.

Во второй главе выбраны и обоснованы материалы, методы и оборудование лабораторных и промышленных исследований.

В качестве материала были выбраны марки стали S235MC и S355MC и их аналоги – сталь 3 и сталь 09Г2С, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную, и поэтому широко востребованные современным машиностроительным производством, применяющим высокотехнологичные методы раскроя металла.

Для достижения поставленной цели в диссертации были проведены эксперименты на 15-роликовой правильной машине агрегата поперечной резки № 3 и 13- и 17-роликовых машинах агрегата поперечной резки № 4, установленных в цехе обработки металла № 2 ПАО «Северсталь». Исследование влияния высокотехнологичной обработки на изгиб листов производилось в промышленных условиях на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и на установке лазерной резки BYSPRINT 3015 по специально разработанной методике определения отклонений от плоскостности полосок, получаемых при раскрое.

На универсальных испытательных машинах Galdabini Quasar 50 и Zwick/Roell HA250 были получены диаграммы деформирования образцов при циклическом знакопеременном нагружении, которые использовались для задания моделей поведения материала при конечно-элементом моделировании.

В третьей главе изложены результаты разработки конечно-элементных моделей в программных комплексах DEFORM и SIMULIA Abaqus, а также результаты экспериментальных исследований влияния параметров правки на отклонение листов после плазменной и лазерной резки.

Первоначально выполненное моделирование в системе DEFORM подтвердило, что правка на РПМ, устраняя неплоскостность, создает неравномерно распределенные по толщине и ширине полосы продольные напряжения. Поскольку при моделировании в системе DEFORM нет возможности задать статический шаг, а значит определить упругое изменение напряжений в полосе после того, как она вышла из роликовой правильной машины и на нее перестали действовать внешние силы, было принято решение об использовании программного продукта SIMULIA Abaqus, позволяющего выполнять междисциплинарное моделирование, включая статический и динамический

анализы напряженно-деформированного состояния горячекатаной полосы, в рамках реализации одного алгоритма.

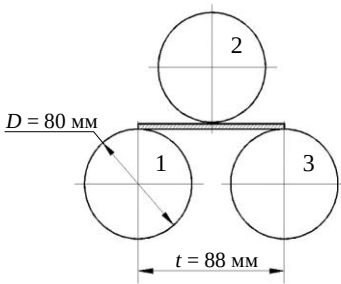


Рис. 1. Схема изгиба полосы в трех роликах

В первом приближении процесс правки может быть сведен к задаче изгиба полосы в трех абсолютно жестких роликах цилиндрической формы (рис. 1). Решение задачи было выполнено в двумерной постановке.

Изгибу подвергался фрагмент полосы толщиной $h = 4$ мм и длиной, равной шагу t между роликами 1 и 3 нижнего ряда. Материал полосы – S235MC со свойствами, полученными при испытаниях образцов. Модель деформируемой среды – упруго-пластическая. Количество конечных элементов по толщине полосы – 16.

Между роликом 2 и верхней поверхностью полосы определено контактное взаимодействие с коэффициентом трения 0,25. Перемещение верхнего ролика вниз составляло 5 мм. На торцах полосы были зафиксированы от перемещений по горизонтали и вертикали точки в середине ее толщины.

Результаты моделирования (рис. 2) показали, что при изгибе полосы при крайнем нижнем положении верхнего ролика (график 1) слои металла сверху испытывают пластические сжимающие напряжения, а нижние – растягивающие. В средней части наблюдается участок с упругими деформациями.

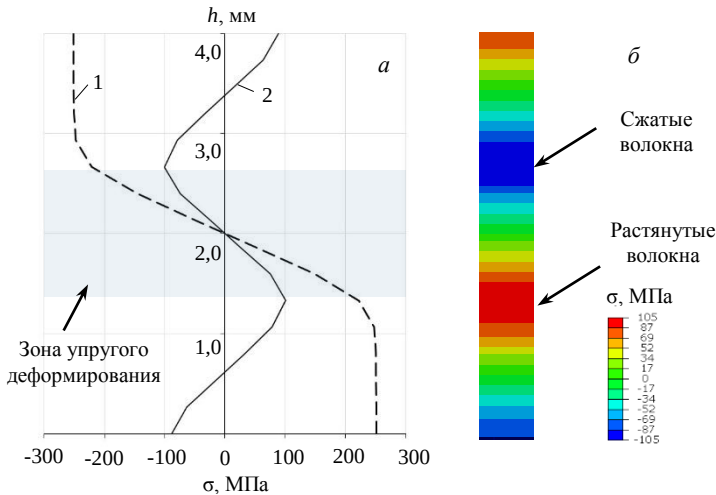


Рис. 2. Графики изменения напряжений по толщине полосы: 1 – под нагрузкой; 2 – после упругой разгрузки (а) с фрагментом поля напряжений после упругой разгрузки (б)

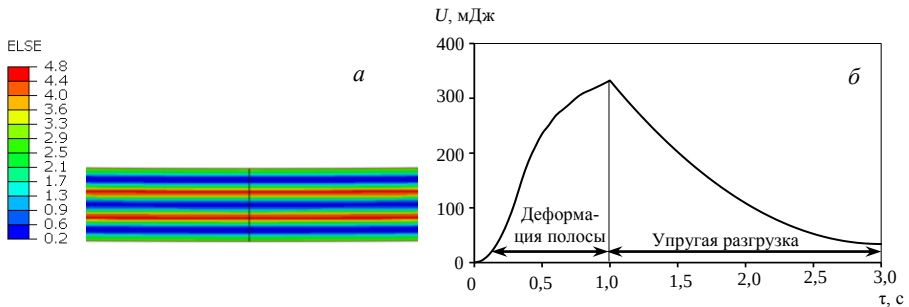


Рис. 3. Распределение потенциальной энергии по толщине полосы после разгрузки, мДж (а) и изменение потенциальной энергии в зависимости от времени процесса (б)

внешнего воздействия происходит упругая разгрузка материала полосы, сопровождающаяся релаксацией напряжений в приповерхностных областях проката (график 2), также с формированием области «стесненных» упругих напряжений в центральной части сечения полосы. Из-за наличия упругих деформаций в середине проката в этой зоне происходит накопление потенциальной энергии деформации при правке. Поскольку необратимые пластические деформации локализованы в приповерхностных слоях проката высотой, равной 1,2 мм сверху и снизу, то при разгрузке эти слои становятся препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии упругой деформации. Это подтверждает распределение потенциальной энергии после разгрузки, полученное в системе SIMULIA Abaqus (рис. 3, а). Максимальные значения соответствуют слоям, располагающимся на высоте от 1,1 до 1,4 мм от поверхности, что соответствует зонам сжатых и растянутых волокон, показанных на рис. 2. Именно наличие стесненной потенциальной энергии приводит к возникновению остаточных напряжений.

При удалении внешних сил накопленная потенциальная энергия расходуется на восстановление первоначального недеформированного состояния полосы. За счет этого в сжатых поверхностных волокнах верхней части возникают внутренние усилия, приводящие к их растяжению, а в нижних растянутых поверхностных волокнах, наоборот, к сжатию. Таким образом, после снятия нагрузки возникают остаточные растягивающие напряжения сверху и сжимающие напряжения снизу (рис. 2), эти напряжения уравниваются напряжениями, возникающими в остальной части сечения металла.

По результатам моделирования был построен график изменения потенциальной энергии U , полученной суммированием всех значений по толщине полосы, в зависимости от времени процесса τ (рис. 3, б). При движении вниз верхнего ролика за время, равное 1 с, произошло накопление потенциальной до 333 МДж, далее при разгрузке в течение 2 с в материале осталась накопленная потенциальная энергия, равная 34 МДж, что составляет 10 % от максимального

уровня. Эта «стесненная» потенциальная энергия при дальнейшей обработке, например при резке листа лазером или плазмой, может высвобождаться и вызывать отклонения от плоскостности получаемых деталей.

Изложенное позволило сделать вывод, что механизм возникновения остаточных напряжений при правке обусловлен неоднородностью распределения деформаций по толщине.

Моделирование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации в системе SIMULIA Abaqus включало следующие этапы:

1) настройка модели – создание конечно-элементной модели полосы, размещаемой между верхними и нижними роликами. На рис. 4 она показана на примере 17-роликовой РПМ. Упруго-пластическая модель полосы длиной 3000 мм имела участок с 36-ю элементами по толщине длиной 700 мм, располагаемый перед началом правки на входе в РПМ, а на остальных участках модель полосы была сформирована из 4-х элементов по толщине;



Рис. 4. Настройка конечно-элементной модели правки полосы в 17-роликовой правильной машине

2) перемещение верхних роликов вниз ($y_2...y_{16}$ на рис. 5) в рабочее положение для обеспечения заданной величины перекрытия или зазора между верхними и нижними роликами;

3) приложение силы тяжести к системе при отсутствии движения роликов;

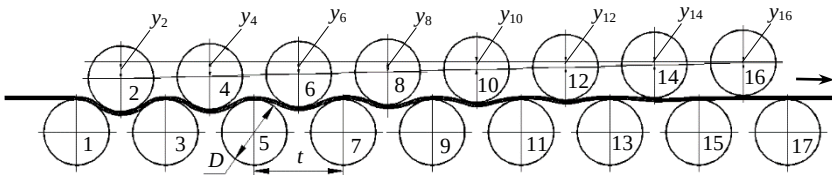


Рис. 5. Схема перемещения верхних роликов при правке в 17-роликовой РПМ

4) задание скорости вращения роликов для моделирования движения полосы за счет сил трения между ней и роликами. Коэффициент трения был принят равным 0,12;

5) оценка упругой разгрузки материала после правки.

На основе разработанной модели процесса правки можно определять не только энергосиловые и геометрические параметры, включая прогиб полосы с измерением значений радиусов кривизны нейтральной линии $R_{\text{крив}}$ под роликами и построение графика изменения кривизны нейтральной линии $\rho = 1/R_{\text{крив}}$ на длине полосы при ее правке, но и такие показатели правки, как остаточные напряжения, изменение потенциальной энергии при правке и изменение относительных продольных пластических деформаций полосы с оценкой уровня пластификации по формуле:

$$k_{\text{plastic}} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_{\text{max}}}\right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{0,2}$ – относительная деформация, соответствующая условному пределу текучести материала полосы; ε_{max} – максимальная относительная деформация полосы при правке.

При правке полос толщиной 3 мм из марок сталей S235MC и S355MC в 17-роликовой РПМ со скоростью $v = 1$ м/с и с наклоном верхней кассеты $\Delta = y_2 - y_{16} = 3$ мм ($y_2 = 6$ мм, $y_{16} = 3$ мм) максимальные пластические деформации отмечаются в первой половине РПМ (рис. 6) – в контактах с роликами № 5 и № 7,

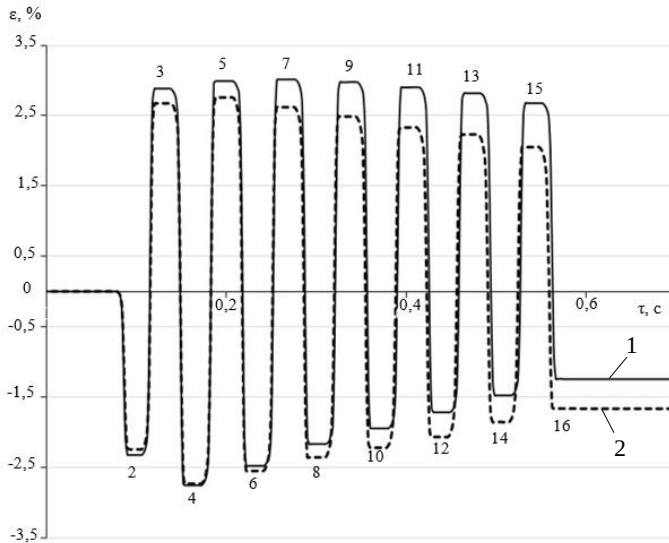


Рис. 6. Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке полос из марок сталей:

1 – S235MC; 2 – S355MC

при правке в последующих роликах, начиная с ролика № 8, наблюдается уменьшение деформации полосы. При правке полосы из марки стали S235MC уровень пластификации в начале процесса равен 93,4 %, а полосы из марки стали S355MC – 92,7 %. При этом максимальные остаточные напряжения в листах $\sigma_{\max}$ для сталей S235MC и S355MC составили 189 МПа и 285 МПа соответственно, а накопленная потенциальная энергия U – 0,29 Дж и 0,52 Дж.

Моделированием установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к разным значениям относительных продольных деформаций и накопленной потенциальной энергии, а также к различным отклонениям напряжений по толщине. Расчетами показано, что режим правки сводит кривизну полосы на выходе практически к нулю, а значит обеспечивается высокая плоскостность полосы. При правке полос одного профилеразмера из марки стали S355MC энергосиловые параметры в среднем возрастают в 1,5 раза в сравнении с процессом правки полос из стали S235MC, а при этом значения радиуса кривизны не изменяются.

Адекватность модели оценивалась путем сравнения относительных продольных деформаций и усилий, действующих на ролики, полученных расчетным методом и измеренных в результате эксперимента на лабораторной 13-роликовой правильной машине инженерами фирмы Fagor Arrasate. Погрешности расчета по модели уровня пластификации полосы и усилий, действующих на ролики в процессе правки, не превысили 1,2 % и 10 % соответственно.

Для изучения влияния параметров процесса правки на изгиб листов после плазменной и лазерной резки, был выполнен промышленный эксперимент, включающий правку горячекатаной полосы толщиной 3 мм и шириной 1500 мм из стали S355MC на 15-роликовой правильной машине фирмы LDM, установленной в АПР-3 ПАО «Северсталь», отбор листов и их порезку на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и установке лазерной резки BYSPRINT 3015. Были выбраны четыре режима правки, отличающиеся величиной наклона верхней кассеты роликов $\Delta = y_2 - y_{14}$ (табл. 1). Скорость правки составляла 1,6 м/с.

Таблица 1

Значения перемещений верхних роликов вниз при правке в 15-роликовой РПМ и полученные при моделировании показатели правки

Номер режима	y_2 , мм	y_{14} , мм	Δ , мм	$k_{plastic}$, %	$\varepsilon_{\text{выход РПМ}}$, %	$\sigma_{\max}$, МПа	U , мДж
1	4,0	3,0	1	84,4	0,802	294	341,1
2	4,5	3,0	1,5	85,5	0,74	297	324,44
3	5,0	2,0	3	87,6	0,661	284	208,93
4	3,0	3,0	0	84,2	0,959	305	342,3

Результаты моделирования (табл. 1) показали, что все режимы правки характеризуются значительным отклонением остаточных напряжений по толщине

(от 280 МПа и выше) и недостаточным уровнем пластификации (менее 90 %). При этом было отмечено, что режиму № 3 соответствуют лучшие показатели правки – наибольшая величина пластификации полосы $k_{plastic}$ и наименьшие значения деформации под последним верхним роликом $\epsilon_{выход\ РПМ}$ и накопленной потенциальной энергии U в сравнении с другими режимами.

В промышленном эксперименте было отобрано восемь листов размерами 3x1500x3000 мм по четыре на каждый вид резки. Отклонения полосок от плоскостности после резки листов определялись согласно разработанной методике:

1. Порезка образца на продольные полосы шириной 100 мм по заданной программе на установке лазерной или плазменной резки.
2. Маркировка каждой полосы.
3. Измерение плоскостности получившихся полосок длиной 3000 мм.
4. Отрезка участков длиной не менее 500 мм по краям полосок на установке лазерной или плазменной резки для исключения влияния механического реза после правки.
5. Определение величины фактического изгиба каждой полоски длиной 2000 мм.

Результаты измерений показали, что число полосок, имеющих отклонения более 5 мм, после плазменной резки составило: 9 – при правке по режиму № 1 (максимальное отклонение было зафиксировано равным 45 мм); 8 – по режиму № 2 (максимальное отклонение – 40 мм); 1 краевая полоска с отклонением 35 мм при правке по режиму № 3 и 10 полосок при правке по режиму № 4 (максимальное отклонение более 100 мм). Результаты измерений изгиба полосок после лазерной резки подтвердили результаты, полученные после плазменной резки. При этом резка листа, прошедшего правку по режиму № 4, из-за сильного изгиба полосок была прекращена досрочно для предотвращения повреждения машины.

Анализ результатов, полученных после двух видов резки, позволил сделать следующие выводы:

- наименьшие отклонения от плоскостности после порезки имели листы, прошедшие правку по режиму № 3, что совпало с результатами моделирования – он отличался лучшими показателями правки;
- разработанная модель правки в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их лазерной или плазменной обработки.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния технологических и конструктивных параметров процесса знакопеременного упруго-пластического изгиба стальных полос на неоднородность их напряженно-деформированного состояния.

С целью исследования влияния режимов правки на напряженно-деформированное состояние горячекатаных полос изучены два этапа правки в роликовых правильных машинах:

1 этап – правка в первой половине роликов РПМ для устранения исходного неоднородного напряженного состояния материала полосы путем достижения максимальной пластической деформации;

2 этап – правка на остальных роликах РПМ для понижения градиента напряжений, сформированного на первом этапе, путем плавного и постепенного уменьшения деформации полосы.

Изучение закономерностей изменения уровня пластификации от параметров настройки РПМ выполнено на основе моделирования процесса правки горячекатаных полос толщиной 3 мм из марок сталей 3 и 09Г2С в 15- и 17-роликовых правильных машинах с вариантами наклона верхней кассеты Δ в диапазоне от 1,5 мм до 7 мм (табл. 2) при скорости правки 1 м/с. Результаты расчета уровня пластификации полосы представлены на рис. 7.

Таблица 2

Значения перемещений роликов вниз в верхней кассете 15- и 17-роликовых правильных машинах

Перемещение верхних роликов, мм	Варианты						
	1	2	2	4	5	6	7
Первого y_2	1,5	3,0	5,0	7,0	3,5	5,0	7,0
Последнего $y_{14}(y_{16})$	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	2,0
$\Delta = y_2 - y_{14}(y_{16})$	1,5	3,0	5,0	7,0	1,5	3,0	5,0

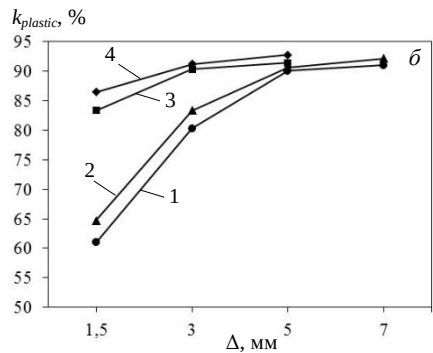
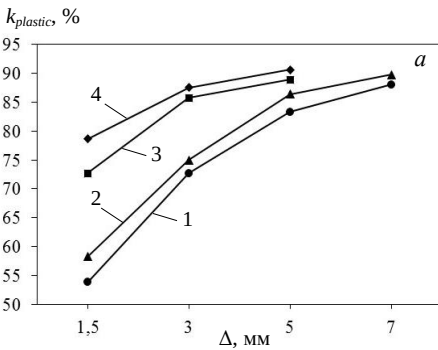


Рис. 7. Уровень пластификации полосы из марок сталей: 1 и 3 – 09Г2С; 2 и 4 – сталь 3 при правке в 15-роликовой (а) и 17-роликовой (б) машинах в зависимости от наклона верхней кассеты и перемещения вниз последнего верхнего ролика:
1 и 2 – 0 мм; 3 и 4 – 2 мм

Анализ полученных данных подтверждает, что с увеличением наклона верхней Δ кассеты уровень пластификации по толщине полосы возрастает, а рост значений перемещений роликов вниз (графики 3 и 4) с сохранением значений Δ также приводит к росту уровня пластификации. Все это позволило сделать вывод

о возможности поиска величины наклона верхней кассеты с обеспечением высокого уровня пластификации металла (90 % и выше) в начале процесса правки без значительного увеличения значений перекрытий роликов, являющихся ограничением по мощности привода правильных машин.

Изучение закономерностей изменения показателей правки на втором этапе выполнено на основе моделирования знакопеременного деформирования в 17-роликовой правильной машине полосы толщиной $h = 3$ мм из марки стали 09Г2С в зависимости от перемещения верхнего последнего ролика РПМ (y_{16}) при одинаковых перемещениях первого верхнего ролика $-y_2 = 5,5$ мм.

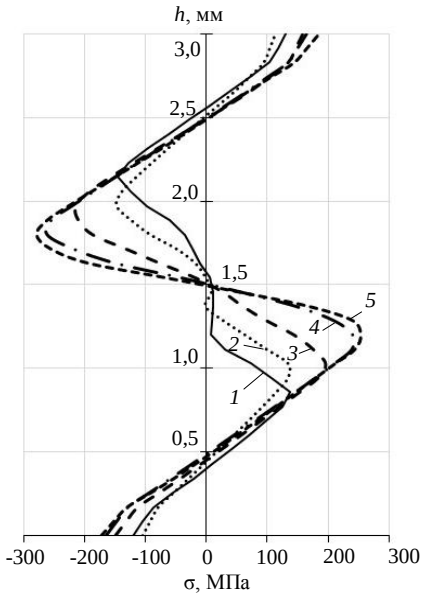


Рис. 8. Графики распределения остаточных напряжений по толщине полосы при перемещении последнего верхнего ролика вниз на величину:
1 – 0 мм; 2 – 0,3 мм; 3 – 0,5 мм;
4 – 1 мм; 5 – 2 мм

На рис. 8 представлены результаты расчета остаточных напряжений по толщине проката после правки. При отсутствии перемещения верхнего последнего ролика вниз $y_{16} = 0$ и при перемещении $y_{16} = 0,3$ мм отклонения напряжений по толщине составляют 146 МПа и 148 МПа соответственно, увеличение значений y_{16} (графики 3 – 5) приводит к высокой релаксации напряжений в приповерхностных областях проката и формированию в средней части толщины высокого уровня напряжений.

Построенные графики изменения потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе U и изменения относительных продольных пластических деформаций ϵ подтвердили, что эти показатели в 2 – 5 раз меньше при $y_{16} = 0$ и 0,3 мм в сравнении с вариантами $y_{16} = 0,5$ мм, 1 мм и 2 мм. При этом во всех вариантах максимальная пластификация полосы в начале

правки под третьим роликом составляла 92 %. Что позволило сделать вывод – в аспекте обеспечения постепенного и плавного уменьшения деформации полосы при ее изгибе в роликах, следует минимизировать значение перекрытия в последних трех роликах РПМ. Однако необходимо учитывать особенности работы роликовых правильных машин. Так, практика работы РПМ в линиях АПР-3 и АПР-4 ПАО «Северсталь» показала, что отсутствие деформации в последних трех роликах может приводить к соударению переднего конца полосы с

рольгангом при выпуске ее из РПМ и возникновению аварийной ситуации. Для исключения этого необходимо задавать перекрытие в последних трех роликах, компенсируя изгиб полосы на выходе. В этом случае из всех рассмотренных режимов может быть рекомендован режим с перемещением последнего верхнего ролика равным 0,3 мм.

Исследование влияния исходной неплоскостности горячекатаной полосы с волной высотой 14 мм и длиной 200 мм на показатели правки показало, что из-за высокой пластификации полосы в начале процесса правки все закономерности распределения исследуемых показателей наблюдаются и при знакопеременном упруго-пластическом деформировании полосы с неплоскостностью.

Для исследования влияния конструктивных параметров РПМ на основные показатели правки, определяющие характер деформаций металла при правке и распределения внутренних остаточных напряжений по толщине листа и, как следствие, отклонения получаемых деталей при раскрое листов высокотехнологичными методами, было выполнено моделирование процесса правки полос в шести вариантах конструкции роликовых правильных машин (табл. 3), отличающихся диаметрами рабочих роликов D , их шагом $t = 1,1D$ и количеством n . Рассматривался режим правки полосы из марки стали S355MC толщиной 4 мм со скоростью правки $v = 1$ м/с и с вертикальным перемещением вниз первого верхнего ролика РПМ $y_2 = 5,5$ мм, а последнего верхнего, равным 0,5 мм, независимо от числа роликов n .

Таблица 3

Конструктивные параметры РПМ и показатели правки, полученные при моделировании

Номер варианта	D , мм	t , мм	n	$\varepsilon_{\max}$, %	$k_{plastic}$, %	$\varepsilon_{\text{выход РПМ}}$, %	$\sigma_{\max}$, МПа	U , мДж
1	110	121	13	1,39	81,98	0,139	173,6	331,2
2	80	88	15	2,04	87,72	0,427	267,4	553,29
3	70	77	15	2,53	90,12	0,32	255,0	571,03
4	70	77	17	2,94	91,50	0,166	188,5	504,99
5	70	77	19	3,49	92,84	0,081	124,4	459,66
6	50	55	19	5,09	95,08	0,359	146,5	326,09

Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы:

1. Уменьшение диаметров роликов с сохранением соотношения между шагом и диаметром роликов, равным $t = 1,1D$, приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине. Максимальная продольная пластическая деформация полосы $\varepsilon_{\max}$ отмечается в варианте № 6 с наименьшим диаметром роликов, равным 50 мм, пластификация в этом случае достигает значения $k_{plastic} = 95$ %.

2. Увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты ведет к росту пластификации полосы, снижению перепада напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии в металле. Из трех вариантов № 3 – № 5 с одинаковыми конструктивными параметрами наилучшие результаты демонстрирует вариант № 5 с наибольшим числом роликов $n = 19$.

Кроме того, показатели правки, полученные для варианта конструкции РПМ № 6 с диаметром роликов 50 мм, можно улучшить в сравнении с вариантом № 5 путем использования режима с меньшим перекрытием роликов на входе.

На основании изложенных результатов моделирования рекомендуется для установки в линию АПР-3 ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19. В этом случае можно снизить перепад напряжений по толщине и увеличить уровень пластификации при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм. После правки на такой машине вероятность сохранения плоскостности листов при последующей обработке существенно повысится.

В пятой главе представлена методика выбора режима правки и результаты ее внедрения в условиях ПАО «Северсталь».

Методика выбора режима правки основана на результатах моделирования и подтверждена экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов. Она позволяет определять настройки РПМ, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.

Последовательность применения методики состоит в следующем (рис. 9).

Этап 1. Анализ исходных данных – параметров роликовой правильной машины и требований к листовому горячекатаному прокату. Основными параметрами РПМ являются число роликов n , их диаметр D , шаг роликов t и скорость правки v , ограничения могут быть диапазоны перекрытий роликов и значений показателей правки. Основными параметрами горячекатаного проката являются геометрические размеры, химический состав и механические свойства.

Этап 2. Расчетная часть содержит определение поведения материала полосы в условиях циклической знакопеременной деформации на универсальной испытательной машине и моделирование в SIMULIA Abaqus, включая следующие стадии:

- Настройка модели РПМ с размещением полосы между верхними и нижними роликами.

- Перемещение всей верхней кассеты роликов вниз параллельно нижней кассете до появления в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликом напряжений σ_{n-1} , превышающих предел текучести материала полосы σ_T . Многократное моделирование процесса правки показало, что верхняя кассета

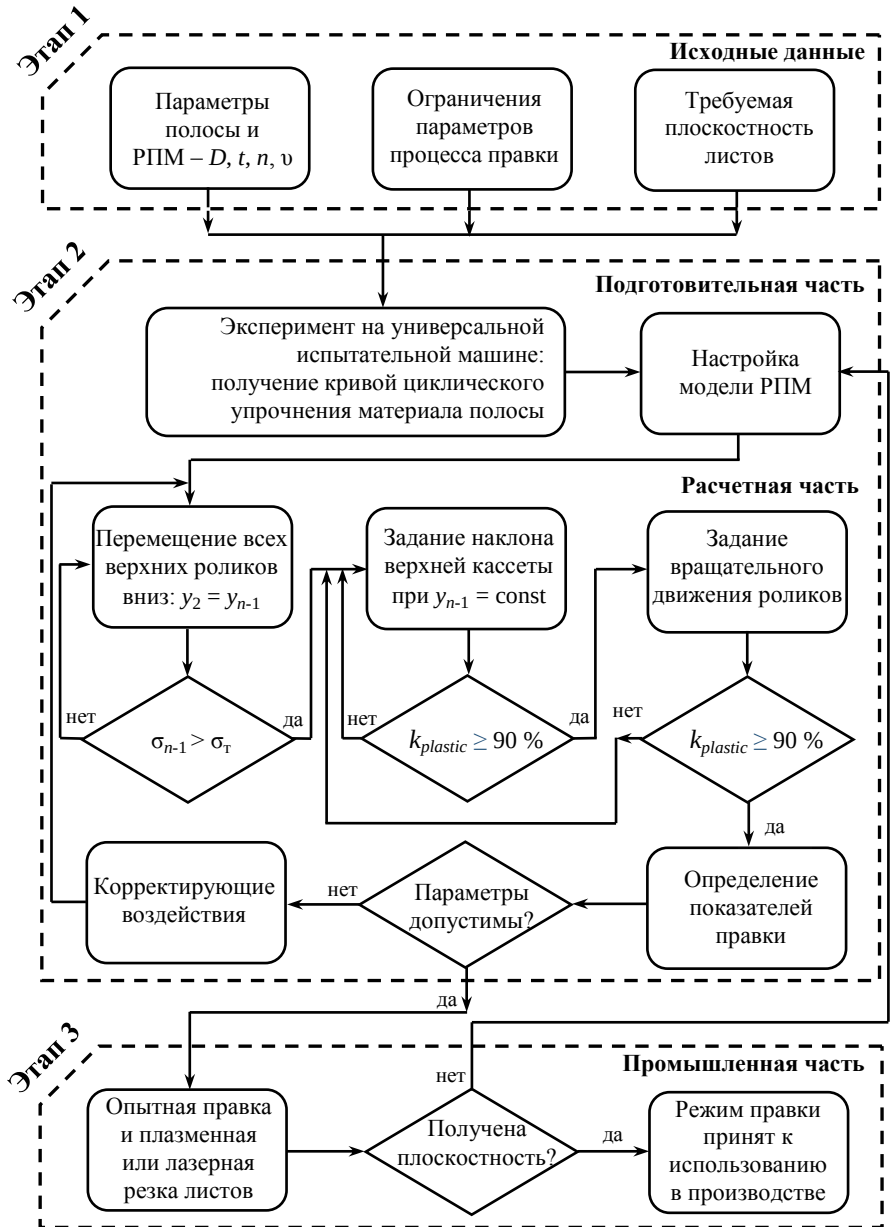


Рис. 9. Схема реализации методики выбора режима правки

должна опускаться вниз на величину, не превышающую 15 % от толщины полосы.

– Задание наклона верхней кассеты при неподвижном последнем верхнем ролике ($y_{n-1} = \text{const}$). Вначале перемещения первого верхнего ролика кассеты y_2 рекомендуется задавать с шагом 1 мм. Тогда перемещение i -го ролика верхней кассеты при известных значениях перемещений y_2 и y_{n-1} определяется из уравнения:

$$y_i = y_2 - [(n_i - 1)t] \frac{y_2 - y_{n-1}}{(n_i - 1)t}, \quad (2)$$

где n_i – номер i -го ролика верхней кассеты РПМ; n – число роликов РПМ; t – шаг роликов.

Выбирается наклон верхней кассеты, обеспечивающий пластификацию материала полосы под роликом № 3, близкую к 90 %.

Уровень пластификации полосы рассчитывается по формуле (1).

– Задание вращательного движения роликов. При этом будет смещение контактов роликов и полосы, а значит и изменение уровня ее деформации. Если он будет недостаточным и пластификация материала полосы под роликом № 3 будет ниже 90 %, то потребуется корректировка величины наклона верхней кассеты, а значит возврат на предыдущую стадию, пока не будет получен режим, обеспечивающий нужную пластификацию.

– Определение показателей правки, включая уровень остаточных напряжений по толщине листа для полученного режима правки, относительную пластическую деформацию и остаточную потенциальную энергию.

Этап 3. Промышленная часть включает опытную правку полос на роликовой правильной машине по полученному режиму с отбором листов, порезкой их на машинах плазменной или лазерной резки на продольные полосы шириной 100 мм и определением величины фактического изгиба каждой полосы. По результатам резки могут быть приняты решения о корректировке технологии.

На основе разработанной методики были рассчитаны режимы правки полос из марки стали S355MC толщиной 4 мм на 17-роликовой РПМ (вариант конструкции № 4 табл. 2), толщиной 8 мм на 15-роликовой РПМ (вариант № 2 табл. 3) и толщиной 10 мм на 13-роликовой РПМ (вариант № 1 табл. 3). На рис. 10 в качестве примера представлены результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм по рассчитанному режиму ($y_2 = 4,5$ мм и $y_{16} = 0,4$ мм) с уровнем пластификации 91 %. Видно, что после правки остаточные напряжения в листе не превышают 80 МПа, а остаточная энергия – 0,26 Дж. Анализ графиков показывает, что разработанный режим характеризуется плавным убыванием продольных пластических деформаций при правке и уравновешенным распределением остаточных напряжений по толщине.

Результаты разработки режимов правки горячекатаных полос из марки стали S355 были использованы для совершенствования технологии правки в 13- и 17-роликовых правильных машинах, установленных в линии АПР-4, и 15-роликовой машины линии АПР-3 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь».

По полученным режимам выполнялась опытная правка полос шириной 1500 мм. Были взяты по три рулона из разных плавок на каждую толщину – 4 мм,

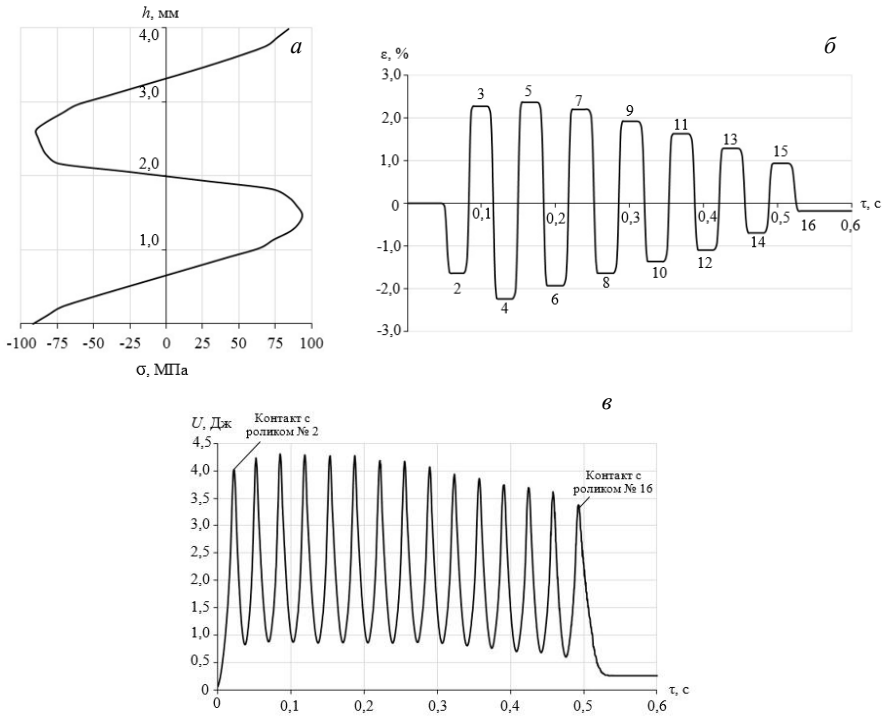


Рис. 10. Результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм:
a – распределение остаточных напряжений; *б* – относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна (цифрами от 2 до 16 обозначены номера роликов); *в* – изменение потенциальной энергии деформации

8 мм и 10 мм. От каждого рулона отбирался один лист, на контрольной плите измерялась высота неплоскостности каждого листа. Порезка листов на продольные полосы шириной 100 мм осуществлялась на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и фиксировалась величина фактического изгиба каждой полосы.

Исходные рекомендованные перемещения верхних роликов вниз и перемещения роликов после точной настройки РПМ приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что после окончательной настройки положения роликов изменились незначительно с сохранением величины наклона верхней кассеты. При этом можно отметить, что при настройке РПМ был учтен полученный при моделировании принцип целесообразности уменьшения значений перемещений последних верхних роликов – все реальные значения не превышают рекомендованных методикой.

Таблица 4

Настройки роликовых правильных машин при правке полос толщиной 4 мм, 8 мм и 10 мм (числитель – рекомендованные, знаменатель – реальные)

Толщина полосы h , мм	Перемещения роликов, мм							
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}
4	<u>4,5</u>	<u>3,91</u>	<u>3,33</u>	<u>2,74</u>	<u>2,16</u>	<u>1,57</u>	<u>0,99</u>	<u>0,4</u>
	4,45	3,86	3,28	2,69	2,11	1,52	0,94	0,35
8	<u>6,5</u>	<u>5,58</u>	<u>4,67</u>	<u>3,8</u>	<u>2,83</u>	<u>1,92</u>	<u>1,0</u>	-
	6,4	5,48	4,57	3,65	2,73	1,82	0,9	-
10	<u>8,0</u>	<u>6,66</u>	<u>5,32</u>	<u>3,98</u>	<u>2,64</u>	<u>1,3</u>	-	-
	7,8	6,46	5,12	3,78	2,44	1,1	-	-

Эксперименты показали, что предложенные режимы правки обеспечивают высокую плоскостность отобранных листов не только после правки, но и после раскроя листов на машине плазменной резки. Во всех случаях отклонение полосок не превысило 2 мм.

На основании промышленных испытаний методика расчета режимов правки была внедрена в производство, а разработанные режимы правки приняты к использованию.

Предложенные усовершенствования технологии производства горячекатаного листового проката в условиях ПАО «Северсталь» позволили получать прокат, пригодный для лазерной резки.

Методику расчета режимов правки можно использовать при проектировании технологий правки разнообразного марочного и профильного сортамента на различных РПМ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполнены исследования факторов технологии и параметров оборудования роликовых правильных машин с целью усовершенствования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации и повышения плоскостности получаемых листов при их дальнейшей обработке.

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации, основанная на методе конечных элементов и отличающаяся от известных возможностью учета неоднородности напряженно-деформированного состояния проката.

2. На основе математического моделирования процесса правки полос в условиях циклической знакопеременной деформации установлено, что:

– механизм возникновения остаточных напряжений обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке;

– после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по

толщине они равны нулю, в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

3. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивают уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

Исследовано влияние конструктивных параметров процесса правки на напряженно-деформированное состояние горячекатаных полос. Установлено, что

- уменьшение диаметров роликов с сохранением соотношения между шагом t и диаметром роликов D , равным $t = 1,1D$, приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине;

- увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты ведет к росту пластификации полосы, снижению перепада напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии в металле.

Для снижения перепада напряжений по толщине при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм даны рекомендации по установке в линию АПР-3 ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19.

4. Разработана научно обоснованная методика выбора режима правки, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов. Методика позволяет определять настройки РПМ, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.

5. На основе разработанной методики рассчитаны режимы правки полос на роликовых правильных машинах, установленных в линиях АПР-3 и АПР-4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь», обеспечивающие минимальные значения остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

6. На основании промышленных испытаний методика расчета режимов правки внедрена в производство, разработанные режимы правки приняты к использованию на ПАО «Северсталь». Предложенные усовершенствования технологии производства горячекатаного листового проката в условиях ПАО «Северсталь» позволили получать прокат, пригодный для лазерной резки.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Выявление и устранение причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // Производство проката, 2017. № 6. С. 11-15.
2. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Применение метода конечных элементов для выявления причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // Металлы, 2018. № 1. С. 103-108.
3. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование напряжений и деформаций в плоской стальной полосе при ее правке в роликовой правильной машине // Черная металлургия, 2018. № 1. С. 68-73.
4. Trusov K.A., Mishnev P.A., Kopaev O.V., Nushtaev D.V. Numerical Simulation of roller levelling using SIMULIA Abaqus // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering, 2017. 287 012014.
5. Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A.* Application of the Finite Element Method to Reveal the Causes of Loss of Planeness of Hot-Rolled Steel Sheets during Laser Cutting // Russian Metallurgy (Metally), 2018. No. 1. P. 103-108.
6. Trusov K. A., Mishnev P. A., Garber E. A., Bolobanova N. L., Nushtaev D. V., Ardatov K. V. Investigation of blank bow defect after roller leveller by finite element analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1063, 2018. 012192.
7. Трусов К.А., Копаяев О.В., Нуштаев Д.В. Моделирование режимов правки плоского проката // Труды Международного форума «Инженерные системы – 2017». Москва: Инжиниринговая компания «ТЕСИС», 2017. С. 128-133.
8. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование и исследование конструктивных параметров роликовых правильных машин // Материалы III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017». Череповец: Череповецкий гос. ун-т, 2017. С. 63-69.
9. Трусов К.А., Болобанова Н.Л. Разработка методики определения параметров правки стальных полос на роликовых правильных машинах // Череповецкие научные чтения – 2017: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч.3. Череповец: ЧГУ, 2018. С. 99-100.