

На правах рукописи



БОЛОБАНОВА Наталия Леонидовна

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛИРОВОК
И УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛКОВ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ
С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОКАТКИ ШИРОКИХ ПОЛОС**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Череповец – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ
Гарбер Эдуард Александрович
- Официальные оппоненты – **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор
кафедры машин и технологии обработки
металлов давлением ФГБОУ ВПО
«Московский государственный
машиностроительный университет
(МАМИ)» /Университет машиностроения/
- **Ионов Сергей Михайлович**
кандидат технических наук, профессор
кафедры пластической деформации
специальных сплавов Национального
исследовательского технологического
университета «МИСиС»
- Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»

Защита диссертации состоится «22» апреля 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук по адресу: г. Москва, Ленинский пр., 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru/ncd-4-15-229/news.html>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Калашников И.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Характерные тенденции развития современного листопрокатного производства – уменьшение допускаемых отклонений от заданной толщины по длине и ширине листов, повышение требований к их плоскостности, освоение на действующих станах технологии прокатки полос толщиной, меньшей, чем предусмотрено первоначальными проектами.

Эти тенденции, особенно заметно проявившиеся в 90-х годах XX века и в первом десятилетии XXI века под влиянием потребностей развивающихся отраслей машиностроения, в частности, автомобильной промышленности, потребовали от металлургов модернизации оборудования прокатных станов и совершенствования технологических режимов прокатки.

Одним из существенных элементов технологического режима листопрокатного стана является профилировка валков. От качества профилировки валков зависят точность выполнения заданного поперечного профиля полосы и ее плоскостность, стойкость валков и равномерность износа поверхностей их бочек. В связи с этим возросла актуальность задачи совершенствования методов профилирования валков, которые до настоящего времени в значительной степени базировались на эмпирическом опыте технологов.

В листопрокатных цехах, как правило, нормируют начальную профилировку холодных валков перед установкой в стан, которую называют «шлифовочная профилировка».

При этом в большинстве случаев задают в качестве шлифовочной профилировки каждого валка лишь величину шлифовочной выпуклости или вогнутости в середине бочки относительно ее торцевых сечений, а жестких требований к форме шлифовочного профиля по длине бочек не предъявляют.

Однако практический опыт показал, что форма шлифовочных кривых по длине бочек рабочих и опорных валков влияет на распределение контактных напряжений вдоль осей валков: по ширине полосы и между рабочим и опорным валками. Неравномерность их искажает поперечный профиль полосы, ухудшает плоскостность полос, вызывает повышенный местный износ и поверхностные разрушения на бочках валков. Поэтому актуальной является задача расчета шлифовочных профилировок валков в виде непрерывных кривых по длине бочек. Ее решению способствует то, что имеется эффективный инструмент моделирования контактного взаимодействия упругодеформируемых твердых тел, позволяющий с минимальной погрешностью рассчитать такую профилировку валков, которая обеспечит равномерность распределения напряжений в контакте рабочего валка с полосой и опорным валком. Это метод конечных элементов, реализованный в объемной (3D) постановке в САЕ-системе (Computer Aided Engineering – компьютерная система поддержки инженерных расчетов, проведения инженерного анализа).

Для расчета профилировок валков САЕ-система ранее не применялась, однако для построения шлифовочных профилировок рабочих и опорных в виде непрерывных кривых по длине бочек ее применение весьма перспективно, т.к. она позволяет, не прибегая к аналитическим выражениям, основанным на тех или иных приближенных допущениях, получить достоверный результат.

Необходимый составной элемент методики расчета профилировок – определение упругих деформаций валковой системы при прокатке. Погрешности их определения уменьшают точность моделирования профилировок валков и в конечном

итоге снижают точность прокатываемых полос в части разнотолщинности и неплоскостности. Так, согласно требованиям современных стандартов на широкий холоднокатаный лист, колебания толщины полосы по всей ее площади не должны превышать 2,0-2,2% от ее номинальной толщины, следовательно, погрешность расчета поперечной разнотолщинности не должна быть больше 2% от номинальной толщины. Поэтому задача повышения точности расчета упругих деформаций валков как часть общей задачи расчета их профилировок является весьма актуальной.

Еще одна актуальная задача – создание методики расчета упругих деформаций валкового узла шестивалковой клети, в которой между рабочим и опорным валками установлен промежуточный валок.

Шестивалковые клети начали применять в конце 80-х годов XX века на некоторых зарубежных заводах. К решению об установке этих клетей привела логика технического развития листопрокатного производства: освоение производства особо тонких холоднокатаных листов (конструкционных – толщиной до 0,2-0,25 мм, жести – толщиной до 0,1-0,15 мм) потребовало уменьшения диаметров рабочих валков с 400-600 мм до 180-200 мм и оснащения рабочих клетей с такими валками комплексом систем регулирования планшетности.

Клети с рабочими валками столь малого диаметра конструктивно удобнее выполнить с промежуточными валками, через которые осуществить их главный привод. Преимущество этих клетей, по сравнению с клетями «кварто», состоит в возможности оснастить средствами регулирования планшетности – гидроизгибом и системой осевой сдвижки – как рабочие, так и промежуточные валки и тем самым расширить, по сравнению с клетями «кварто», диапазон управляющих воздействий при регулировании поперечного профиля прокатываемой полосы.

Однако эти клети значительно дороже в изготовлении и эксплуатации, чем четырехвалковые. Чтобы объективно определить диапазоны профилиразмеров и марок стали, когда целесообразно использовать шестивалковую клеть, а когда – можно обойтись клетью «кварто», необходимо иметь математическую модель упругих деформаций шестивалковых клетей. Актуальность ее разработки возросла в связи с тем, что на металлургических предприятиях России прорабатывают вопрос о вводе в действие шестивалковых клетей.

Степень разработанности проблемы. Профиль бочки рабочих валков со стороны контакта с прокатываемой полосой, формирующий ее поперечное сечение, называют «активная образующая». Она представляет собой результат геометрического суммирования (суперпозиции) кривых шлифовочного, теплого профиля и износа валков с кривыми их упругих деформаций, во взаимодействии с прокатываемой полосой, подвергаемой обжатию в очаге деформации. Степень проработанности методов расчета указанных составляющих активной образующей существенно различна.

Подавляющее большинство публикаций, касающихся расчета *шлифовочной профилировки валков*, не содержит метода ее построения в виде непрерывной кривой по длине бочки.

Анализ литературы, посвященной *методам расчета упругих деформаций валков* листовых станов, показал, что при определении упругих деформаций не полностью учитываются реальные условия контактного взаимодействия подушек валков с опорными поверхностями узла станин, что не дает возможности обеспечить при профилировании валков необходимую точность поперечного профиля прокатываемых полос.

Вопрос определения *тепловых профилей бочек рабочих и опорных валков* достаточно подробно освещен в литературе: методика моделирования теплового профиля валков в виде непрерывных кривых по длине бочки изложена в 4-х монографиях Э.А. Гарбера с соавторами, в том числе последняя опубликована в 2013 году. Методику и результаты этих работ можно использовать при расчете профилировок без какой-либо доработки.

Что касается учета *износа поверхностного слоя бочек валков*, то он зависит от большого числа факторов, различных для каждого действующего стана (износостойкости материала и технологии изготовления валков, режимов их перешлифовок, температурно-деформационных и скоростных режимов прокатки, нормативных межперевалочных периодов и других). Поэтому создание универсальной методики прогнозирования износа, пригодной для всех станов, нецелесообразно. Более корректный подход – получение на каждом стане статистически достоверных профилограмм износа по длине бочки валков и использование их в методике расчета профилировок.

На основании вышеизложенного можно констатировать, что развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов – актуальная научно-техническая задача, ряд важных аспектов которой требует дальнейшей проработки.

Объект и предмет исследования. *Объектом исследования* являются профилировки и упругие деформации валков листовых станов. *Предмет исследования* – методы моделирования профилировок и упругих деформаций валков во взаимосвязи с их тепловым профилем, износом и поперечным профилем прокатываемых полос.

Цель работы. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков рабочих клетей листовых станов, в том числе шестивалковых, для повышения точности прокатываемых широких полос в части поперечной разнотолщинности и плоскостности, а также для уменьшения расхода валков.

Задачи работы. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка новой методики расчета шлифовочных профилировок рабочих и опорных валков листовых станов в виде непрерывных кривых по длине бочки, учитывающей упругие деформации, тепловые профили, неравномерный износ по длине бочки и требуемые показатели точности прокатываемых полос;
- разработка усовершенствованного метода моделирования упругих деформаций валков рабочих клетей листовых станов путем создания трехмерной конечно-элементной модели валкового узла с граничными условиями, максимально приближенными к реальным условиям контактного взаимодействия валковых опор с узлом станин;
- использование разработанных моделей для сопоставительного анализа эффективности регулирования показателей точности прокатываемых полос в четырехвалковой и шестивалковой клетях;
- применение выполненных разработок для совершенствования технологических режимов прокатки, улучшения качества проката и повышения стойкости валков.

Научная новизна.

1. Разработана новая методика моделирования шлифовочных профилировок валков листовых станов в виде непрерывных, плавно сопрягающихся кривых по длине бочки, впервые использующая САЕ-систему, включающая построение кривых

активных образующих и позволяющая определить неравномерность распределения во время прокатки упругих деформаций и контактных напряжений по длине бочки и по ширине полосы.

2. Разработан усовершенствованный метод моделирования упругих деформаций валков листовых станов, основанный на трехмерной конечно-элементной модели валкового узла, отличающийся от известных методов тем, что в конечно-элементную модель включены подшипниковые опоры с подушками и контактирующие с ними поверхности узла станин, при этом условия контактного взаимодействия подушек со станинами максимально приближены к реальным.

3. Разработана математическая модель упругих деформаций шестивалковой клетки, выполнен сопоставительный анализ жесткости шестивалковой и четырехвалковой клеток и их эффективности при регулировании показателей точности прокатаемых полос.

Достоверность результатов работы. Результаты моделирования упругих деформаций, шлифовочных профилировок и активных образующих валков получены на основе фундаментальных положений теории упругости, с использованием компьютерных технологий CAD/CAE. Достоверность рассчитанных шлифовочных профилировок валков подтверждена также путем их промышленных испытаний и внедрения на действующих станах. Достоверность результатов моделирования параметров шестивалковых клеток, которые пока не эксплуатируются на предприятиях черной металлургии в России, подтверждена путем сопоставления их с опубликованными результатами зарубежных авторов и сравнения результатов моделирования аналитическим методом и численным методом с помощью CAE-системы.

Практическая значимость и реализация результатов работы. С использованием результатов, изложенных в диссертации, были разработаны, испытаны и внедрены:

- новые шлифовочные профилировки валков пятой клетки на стане холодной прокатки 1700 ОАО «Северсталь», позволившие устранить на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлые прикромочные полосы с шероховатостью поверхности, превышающей допустимое значение $R_a = 1,9$ мкм;

- скорректированные вогнутые шлифовочные профилировки рабочих валков чистовой группы на стане горячей прокатки 2000 ОАО «Северсталь», обеспечившие выполнение жестких требований к поперечному профилю горячекатаного подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента.

Профилировки рабочих валков, рассчитанные по новой методике, дали возможность прокатывать полосы с жесткими допусками по толщине и с улучшенной микрогеометрией поверхности.

С использованием новой методики разработана оригинальная шлифовочная профилировка опорных валков, состоящая из трех участков параболических кривых, имеющих в сопряжениях общие касательные, при этом крайние кривые плавно сопрягаются с торцом бочки, в результате неравномерность давлений в межвалковом контакте сведена к минимуму, что резко снизило склонность к выкрашиванию поверхностного слоя бочки. Профилировка опорных валков принята к внедрению на толстолистовом стане 5000 ПАО «Северсталь».

Результаты моделирования упругих деформаций шестивалковой клетки могут быть использованы технологами цехов холодной прокатки, а также при реконструкции действующих и проектировании новых широкополосных станов.

Личный вклад соискателя. Личное участие автора выразилось в получении основных научных результатов, в разработке новых профилировок валков, которые были приняты к использованию на листовых станах и позволили усовершенствовать технологии горячей и холодной прокатки широких полос.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийском научном семинаре «Научно-технический прогресс в металлургии» в рамках научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения – 2011» (г. Череповец, 2011 г.), на Международных конференциях по теме «Технологии и оборудование для прокатного производства» (г. Москва, 2012 г. и 2014 г.), на Международном научном семинаре «Научно-технический прогресс в металлургии – 2012» (г. Череповец, 2012 г.), на научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (г. Липецк, 2012 г.) и на I Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2013» (г. Череповец, 2013), Международного научного семинара «Проблемы металлургии – 2014» (г. Череповец, 2014).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также учебное пособие.

Соответствие паспорту специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации соответствует пунктам 1, 2, 4, 7 паспорта специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением (п. 1. Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением; п. 2. Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования; п. 4. Оптимизация процессов и технологий обработки давлением для производства металлопродукции с заданными характеристиками качества; п. 7. Исследование контактного взаимодействия пластически деформируемого материала и упруго деформируемого рабочего инструмента с целью повышения его долговечности и надежности эксплуатации).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 82 наименований и приложения. Работа содержит 123 страницы машинописного текста, 41 рисунок, 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен обзор научно-технических публикаций, посвященных методам моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов.

Проанализированы наиболее известные методы моделирования шлифовочных профилировок валков листовых станов. Установлены недостатки, снижающие точность этих методов и в конечном итоге не позволяющие получить горячекатаные и холоднокатаные полосы с поперечной разнотолщиностью и плоскостностью, удовлетворяющими жестким требованиям современных мировых стандартов:

1. Подавляющее большинство известных, применяемых в технологии методов предусматривает определение шлифовочной выпуклости или вогнутости на длине бочки валков как разности диаметров в ее середине и на краевых участках, а не шлифовочного профиля в виде непрерывной кривой по длине бочки.

2. Параметры, учитываемые при расчете профилировок валков (упругие деформации валковой системы, особенности контактного взаимодействия рабочего и опорного валков, неравномерность их износа и теплового профиля) определяются в известных методах приближенно, без анализа погрешности определения конечного показателя – поперечной разнотолщинности прокатываемых полос.

Анализ известных методов расчета упругих деформаций валков показал, что все они не учитывали реальных особенностей контакта опорных узлов валков со станинами рабочей клетки. В частности, в них не рассматривались условия взаимодействия подушек валков с опорными плоскостями окон станин, от которых зависят упругие деформации валков. Также установлено, что во всех без исключения известных аналитических методах расчета упругих деформаций валков принято, что форма кривой упругой деформации рабочего валка в контакте с полосой подчиняется параболическому закону по всей длине бочки. Однако на практике в контакте рабочего валка с полосой плавная параболическая кривая имеет место только на среднем участке бочки, меньшем ширины полосы, а на остальной части бочки кривая упругой деформации имеет неплавную и непараболическую форму, что объясняется особенностями упругого сплющивания в контакте полосы с рабочими валками и отсутствием его на свободных от полосы участках их бочек.

Кроме того, аналитический обзор показал, что в технической литературе отсутствует однозначное определение понятий «профилировка валков», «упругая деформация валков». В связи с этим выполнено упорядочение терминологии, относящейся к этим понятиям: даны четкие определения, раскрывающие сущность и взаимосвязь следующих терминов: «шлифовочная профилировка валка», «активная образующая валка», «тепловой профиль бочки валка», «упругие деформации бочки валка», «профиль износа бочки валка», «шлифовочное и тепловое профилирование валков», «процесс формирования активных образующих валков». Эти определения приведены в диссертации.

Для совершенствования методов моделирования упругих деформаций и профилировок валков и устранения указанных выше недостатков известных методов обоснована целесообразность применения компьютерной технологии, дающей возможность рассчитать профилировки и упругие деформации валков в виде непрерывных кривых по длине бочек.

Учитывая также, что в некоторых зарубежных цехах холодной прокатки для производства высокоточных особо тонких полос используют, наряду с четырехвалковыми, шестивалковые клетки, обоснована актуальность разработки методики расчета упругих деформаций шестивалковых клетей и ее применения для определения диапазонов профилиразмеров полос, при производстве которых шестивалковые клетки имеют преимущества перед четырехвалковыми.

Во второй главе изложены новые методы моделирования шлифовочных профилировок и упругих деформаций валков листовых станов.

Основные принципы создания новой конечно-элементной модели узла валков клетки «кварто». Для разработки новой методики расчета шлифовочных профилировок валков листовых станов в виде непрерывных кривых по длине бочки был применен один из методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния упругих тел – метод конечных элементов, реализованный в САЕ-системе.

Выполнив многовариантное моделирование с различными граничными условиями, было установлено, что точность расчета упругих деформаций и напряжений, действующих в валках, а также поперечного профиля полосы

существенным образом зависит от соответствия исходных данных для конечно-элементной модели валкового узла реальным условиям контактного взаимодействия валков с полосой, узлом станин и в зоне межвалкового контакта. Учитывая это, для максимального приближения контактных условий между полосой, валками и опорными элементами рабочей клетки к реальным условиям технологического процесса разработана усовершенствованная конечно-элементная модель валкового узла клетки «кварто» (рис. 1). Бочки сеточных моделей опорного и рабочего валков выполнили с

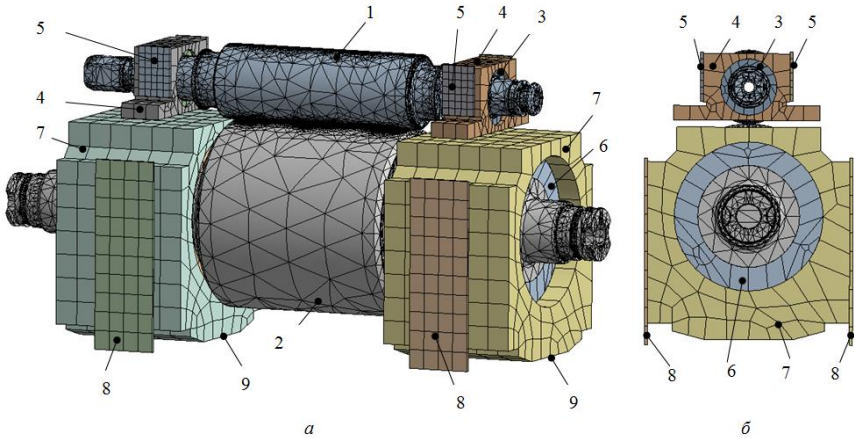


Рис. 1. Конечно-элементная модель нижней пары валков клетки «кварто»:

a – общий вид; *б* – вид с неприводной стороны:

- 1 – рабочий валок; 2 – опорный валок; 3 – подшипники рабочего валка; 4 – подушки рабочего валка; 5 – планки, закрепляемые на опорных плоскостях корпусов, установленных в окнах станин; 6 – подшипники опорного валка; 7 – подушки опорного валка; 8 – планки, закрепляемые в вертикальных плоскостях окон станин; 9 – грани подушек опорных валков, находящиеся в контакте с нажимными устройствами

исходными (принятыми по технологии) шлифовочными профилировками, имеющими максимальные значения выпуклостей или вогнутостей в середине бочки $\Delta D_{\text{шл.оп}}$ и $\Delta D_{\text{шл.р}}$, равные:

$$\begin{aligned}\Delta D_{\text{шл.оп}} &= D_{\text{оп.с}} - D_{\text{оп.к}}; \\ \Delta D_{\text{шл.р}} &= D_{\text{р.с}} - D_{\text{р.к}},\end{aligned}$$

где $D_{\text{оп.с}}$ и $D_{\text{р.с}}$ – диаметры в середине бочек; $D_{\text{оп.к}}$ и $D_{\text{р.к}}$ – диаметры у краев бочек (для опорного валка – у края активной части бочки, без учета скосов). При вогнутой исходной профилировке величина $\Delta D_{\text{шл.оп}}$ или $\Delta D_{\text{шл.р}}$ является отрицательной.

Исходное межосевое расстояние между виртуальными рабочим и опорным валками z задавали из условия, чтобы до приложения рабочей нагрузки (силы прокатки) валки соприкасались точками профилей бочек, принадлежащими сечениям с максимальными диаметрами.

Нижние грани подушек опорного валка 9 (рис. 1) жестко закреплены, так как в реальной клетки они опираются на плоские поверхности клиновых нажимных устройств, установленных на нижних поперечинах станин. Также жестко закреплены

на вертикальных плоскостях окон станин планки 5 и 8. Такая схема закреплений, как и в реальной клетке «кварти», дает возможность шейкам рабочих валков с подшипниками и подушками перемещаться по вертикали и поворачиваться относительно неподвижных вертикальных опорных поверхностей узла станин, преодолевая только силы трения скольжения, а подушки опорных валков ограничены в вертикальных перемещениях контактом с нажимными устройствами. В контакте рабочего и опорного валков было выполнено измельчение и структурирование сетки и задан коэффициент трения покоя. В контактах планок 5, 8 и подушек валков был задан коэффициент трения скольжения.

К модели рабочего валка со стороны полосы приложили силу прокатки, распределенную по площади очага деформации, ширина которого определяется шириной прокатываемой полосы. Длину очага деформации рассчитали заранее по наиболее точной из известных методик, которая была проверена нами с использованием метода конечных элементов. На поверхности контакта модели рабочего валка с прокатываемым металлом был настроен размер конечных элементов и создана упорядоченная сетка.

В результате приложения указанных нагрузок в каждой точке рабочего и опорного валков сеточной модели была определена величина упругой деформации (изменения ее положения от исходного, ненагруженного состояния), что дало возможность получить кривую активной образующей рабочего валка в контакте с прокатываемой полосой.

Исследование по модели упругих деформаций валков и определение поперечного профиля полосы было выполнено на реальном сорimente и режимах прокатки действующего пятиклетового стана холодной прокатки 1700. Данные о фактических режимах брали из АСУ ТП стана, исследуемый объем составил более 250 режимов. Рассчитывали упругие деформации валков пятой клетки, так как на выходе из нее было известно фактическое значение поперечной разнотолщинности полосы. На рис. 2 показана кривая упругой деформации нижнего рабочего валка при прокатке полосы автомобильного сортамента: сталь 08Ю, ширина 1300 мм и толщина 0,76 мм в пятой клетки пятиклетового стана 1700. Размеры валков и их профилировки: $D_p = 600$ мм; $D_{оп} = 1500$ мм и $\Delta D_{ш.р} = 0,1$ мм; $\Delta D_{ш.оп} = 0,4$ мм, опорный валок без скосов.

Анализ кривой на рис. 2 позволяет сделать следующий вывод.

Допущение о плавной параболической форме кривой упругой деформации по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой нуждается в корректировке: кривая

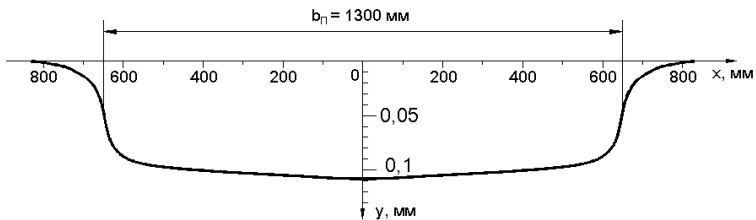


Рис. 2. Кривая упругих деформаций нижнего рабочего валка пятой клетки стана 1700 в вертикальной плоскости (усилие прокатки $P = 11,2$ МН):
 x – расстояние от середины бочки; y – упругие деформации точек поверхности относительно деформации краев бочки

на рис. 2 имеет неплавную и непараболическую форму. Наибольшая упругая деформация наблюдается на среднем участке бочки длиной около $0,9b_{п.}$. За пределами этого участка, в зонах контакта с боковыми кромками полосы, кривая имеет резкие перепады в направлении к торцам бочки.

Далее, применяя принцип суперпозиции кривых упругих деформаций и теплового профиля, можно получить окончательный профиль бочки рабочего вала в вертикальной осевой плоскости со стороны контакта с прокатываемой полосой – его активную образующую.

На рис. 3 показан результат геометрического суммирования кривой 1 распределения по длине бочки нижнего рабочего вала упругих деформаций и кривой 2 – теплового профиля рабочего вала – методом суперпозиций, с учетом противоположного направления упругих и тепловых деформаций. Поскольку в трехмерной модели валки имели реальные профилировки, в кривой 1 они учтены, а тепловая выпуклость на длине бочки (разность диаметров в середине и у торца бочки) согласно данным расчетов, подтвержденным измерениями на стане 1700, равна $\Delta D_{\text{тепл.р.}} = 0,20$ мм.

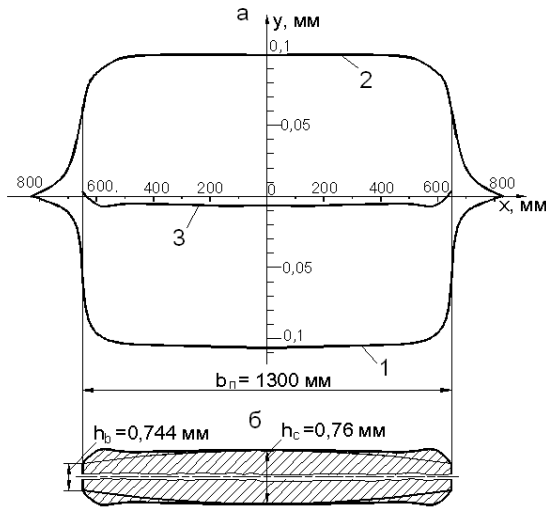


Рис. 3. Определение поперечного профиля полосы:
а – суперпозиция кривых упругих деформаций 1 и теплового
профиля валков 2; б – поперечный профиль полосы

Кривая 3 на рис. 3 – результат суперпозиции кривых 1 и 2 – представляет собой активную образующую рабочего вала, определяющую контур поперечного профиля полосы и его расчетную поперечную разнотолщинность: $\delta h_{\text{поп}} = h_c - h_b$, где h_c , h_b – толщины в середине и у боковой кромки.

Результаты моделирования деформаций верхнего и нижнего рабочих валов, полученные из условия, что толщина полосы в середине равна заданной номинальной, оказались следующими: $h_c = 0,76$ мм, $h_b = 0,744$ мм, $\delta h_{\text{поп}} = 0,016$ мм, $(\delta h_{\text{поп}} / h_c) \cdot 100 \% =$

= 2,1 %. Фактическая поперечная выпуклость полосы, находилась в диапазоне 1,5-2,2% от h_c . Как видно, расчетная поперечная выпуклость полосы попала в диапазон фактических значений $\delta h_{\text{поп}}$, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

Исследование шлифовочных профилировок валков с помощью разработанной модели выполнили для двух вариантов валкового узла пятой клетки пятиклетевого стана холодной прокатки 1700. В первом варианте модели опорный валок выполнили с коническими скосами длиной по 100 мм и глубиной у торцов бочки 2,5 мм (согласно чертежу реального опорного валка), во втором варианте опорный валок выполнили без скосов.

Каждая из кривых упругих деформаций рабочего валка, полученных в результате моделирования обоих вариантов, была геометрически просуммирована с кривой теплового профиля его бочки. Кривые теплового профиля построены по известной методике, неоднократно проверенной на ряде листовых станов. В результате был получен окончательный профиль активной образующей бочки рабочего валка в вертикальной осевой плоскости, со стороны контакта с прокатываемой полосой. Это построение и его результаты показаны на рис. 4 для двух вариантов профиля бочки опорного валка: *a* – со скосами длиной по 100 мм, *б* – без скосов.

Анализ графиков, приведенных на рис. 4, дает основание для следующих выводов:

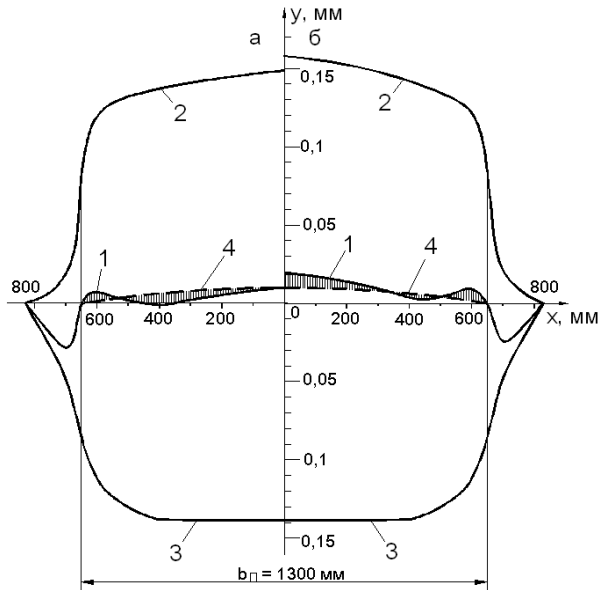


Рис. 4. Активная образующая верхнего рабочего валка 1 и метод ее построения путем суперпозиции кривых упругой деформации 2 и теплового профиля 3 для двух вариантов профиля опорного валка: *a* – со скосами длиной 100 мм; *б* – без скосов (заданная выпуклость поперечного профиля полосы $\delta h_{\text{поп}} = 0,02$ мм, 5^я клеть стана 1700, ширина и толщина полосы 1300 мм и 1 мм, 4 – нормативная форма поверхности поперечного профиля полосы)

1. При использовании опорных валков как со скосами, так и без скосов форма кривой активной образующей и той ее части, которая определяет контур поперечного профиля полосы, не является плавной и существенно отличается от плавной нормативной формы наружной поверхности поперечного профиля полосы. Отклонения толщины на ширине полосы составляют: в варианте *a* (со скосами) до 0,02 мм; в варианте *b* (без скосов) до 0,04 мм.

2. Выполнение шлифовочной профилировки рабочих валков в виде плавной поверхности по длине бочки (независимо от того, выполняется ли она выпуклой, вогнутой или цилиндрической) не обеспечивает плавной формы поверхности поперечного профиля полосы, т. к. кривые упругой деформации и теплового профиля бочки имеют неплавную, непараболическую и неодинаковую форму.

Применение метода конечных элементов для построения кривых упругой деформации валков и их активных образующих создает возможность подбора для каждого профилеразмера сортамента стана таких шлифовочных профилировок валков и режимов их охлаждения, которые в значительной степени устраняют неравномерность обжатий и вытяжек по ширине прокатываемой полосы.

Самый эффективный метод решения этой задачи – выполнение шлифовочных профилировок рабочих валков не в виде плавных кривых, а со впадинами и выпуклостями, зеркально противоположными отклонениям от плавной формы активных образующих, показанных на рис. 4.

Вариант такой скорректированной профилировки со шлифовочной выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм показан на рис. 5.

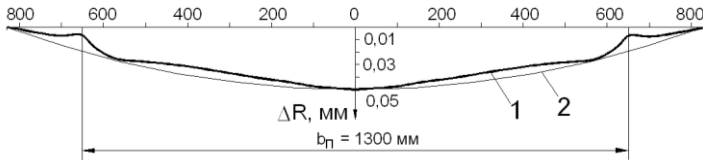


Рис. 5. Скорректированная шлифовочная профилировка рабочего валка с выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм: 1 – скорректированный профиль; 2 – обычный профиль (опорный валок со скосами длиной 100 мм и глубиной 2,5 мм; ΔR – отклонение радиуса бочки от минимального значения)

При использовании вальцешлифовальных станков с числовым программным управлением выполнение подобной профилировки не вызовет затруднений.

Суперпозиция кривой упругой деформации рабочего валка с профилировкой, показанной на рис. 5, и его тепловым профилем дает активную образующую с отклонениями от плавной формы, не превышающими 0,005 мм.

Однако следует учитывать, что в течение межперевалочного периода рабочих валков на стане прокатывают полосы различной ширины. Поэтому необходимо провести построения, показанные на рис. 4 и 5, как минимум для трех ширин сортамента: максимальной, минимальной и средней, а затем, получив три варианта скорректированных шлифовочных профилировок, усреднить их так, чтобы окончательный шлифовочный профиль валков обеспечил получение поперечной разнотолщинности полосы с минимальными отклонениями от нормативной величины.

Полученная после указанных действий окончательная усредненная форма шлифовочной кривой, показана на рис. 6.

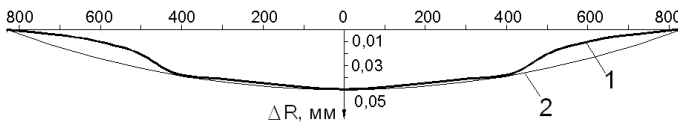


Рис. 6. Усредненная шлифовочная профилировка верхнего рабочего вала с выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм: 1 – скорректированный (усредненный) профиль; 2 – обычный профиль ΔR – отклонение радиуса бочки от минимального значения)

В результате суперпозиции кривых упругой деформации и теплового профиля рабочего вала с профилировкой, показанной на рис. 6, поперечная разнотолщинность полос всего диапазона ширин не превышает заданной – 0,02 мм или 2 % от номинальной толщины.

Разработка нового метода профилирования опорных валков толстолиствого стана 5000. Технологическая практика одного из станов с наиболее длинной бочкой – толстолиствого стана 5000 – показала, что существующая на стане система профилировок вызывает преждевременные поверхностные разрушения опорных валков в переходных зонах от гладкой бочки к скосам (двойным и одинарным) и от скосов к торцевой фаске. Это свидетельствует об опасных контактных напряжениях между бочками рабочих и опорных валков в этих зонах.

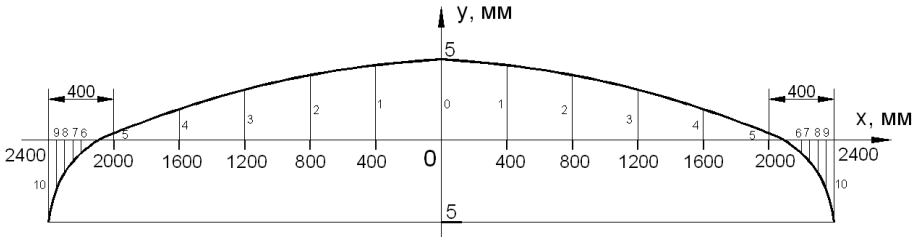
Для поиска путей уменьшения опасных контактных напряжений были проанализированы данные о профилировках, износе, поверхностных дефектах валков, колебаниях толщины по длине и ширине листов. Была создана компьютерная модель системы профилировок валков на базе изложенной новой методики и адаптирована к параметрам технологии стана 5000.

Расчеты по разработанной модели показали, что расчетные поперечные разнотолщинности полосы оказались близки к фактическим. Полученные распределения напряжений по длине бочки опорного вала показали, что на опорный валок и с одинарными, и с двойными скосами действуют пиковые значения напряжений со стороны рабочего вала в трех местах: в месте, где кончается гладкая часть бочки и начинается скос; в месте, соответствующем боковой кромке листа; в месте, где активная часть бочки переходит в фаску. Максимальные значения пиковых напряжений при прокатке самого узкого листа $b = 2098$ мм равны 100-150 МПа, а самого широкого листа $b = 4752$ мм: 160-280 МПа, т.е. они более опасны. В средней части бочки, где пики отсутствуют, уровень напряжений 20-50 МПа, т.е. в 5-14 раз меньше, чем пиковые значения.

Для разработки новой системы профилировок валков был выполнен анализ поперечного профиля листов при существующих профилировках. Было установлено, что задачу исключения пиковых напряжений в межвалковом контакте следует решать путем изменения профилировки бочек опорных валков, оставив за профилировками рабочих валков только функцию формирования поперечной разнотолщинности листов.

Опробовав по новой методике разные варианты профилировок бочек опорных валков, была разработана принципиально новая профилировка опорного вала,

показанная на рис. 7. Значения профилировки опорного вала показаны с привязкой к длине бочки (горизонтальная ось совпадает с направлением оси вала).



№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, мм	0	400	800	1200	1600	2000	2200	2250	2300	2350	2400
Выпуклость на радиус, мм	5	4,704	4,09	3,149	1,902	0,419	-0,859	-1,421	-2,219	-3,385	-5

Рис. 7. Профилировка опорного вала и ее размеры с привязкой к длине бочки

Новизна профилировки, показанной на рис. 7 состоит в том, что профиль выполняют в форме участков трех выпуклых парабол: одного – в средней части бочки, и двух сопряженных с ним по краям, причем в каждом из сопряжений участки парабол имеют общую касательную, а краевые участки плавно сопрягают с торцом бочки так, что касательные в местах сопряжений перпендикулярны к оси вала.

Такое выполнение всех сопряжений обеспечило существенное уменьшение контактных напряжений в межвалковом контакте. Это видно из графика рис. 8, построенного по результатам компьютерного моделирования – контактные напряжения между опорным и рабочим валами снижены в 3-5 раз.

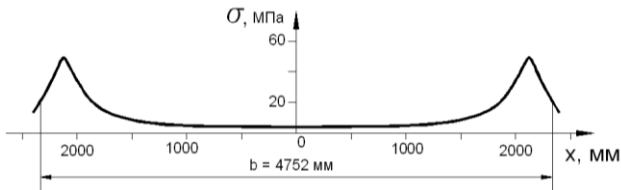


Рис. 8. Распределение напряжений по длине бочки опорного вала в контакте с рабочим валком с профилировкой опорного вала, представленной на рис. 7, при прокатке листа максимальной ширины

Новая профилировка опорного вала принята к промышленным испытаниям, которые запланировано начать в августе 2015 г., после окончания работ по модернизации вальцешлифовального станка.

В третьей главе показано применение нового метода моделирования профилировок валков для усовершенствования технологии листовых станов.

Применение новой методики расчета профилировок валков для улучшения качества холоднокатаных полос. Некоторые результаты изложенной методики были использованы для совершенствования технологического режима непрерывного пятиклетевого стана холодной прокатки 1700 ОАО «Северсталь». Цель исследования

состояла в устранении на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлых прикомочных полос с шероховатостью поверхности $R_a = 2,2-3,0$ мкм, превышающей допустимое значение $R_a = 1,9$ мкм. Было установлено, что причиной данного дефекта является пониженное давление на рабочий валок со стороны опорного на участках, где выполнены скосы. Для устранения указанного дефекта было решено отказаться от скосов по краям бочек опорных валков пятой клетки, скомпенсировав их увеличением выпуклости в середине бочки опорных валков, и пересчитать профилировки рабочих валков пятой клетки для всего диапазона ширин и толщин сортамента стана, чтобы сохранить их плоскостность.

Шлифовочную выпуклость опорного валка варьировали в реальном диапазоне, предварительно установленном с учетом практического опыта: $\Delta D_{ш.оп} = 0,3-0,6$ мм. Шлифовочные выпуклости рабочих валков определяли согласно приведенной выше методике для каждого варианта $\Delta D_{ш.оп}$, исходя из требования, чтобы при прокатке одновременно выполнялись два условия:

1. Исключение контакта краев бочек верхнего и нижнего рабочих валков.
2. Поперечная разнотолщинность полосы не должна превышать допускаемого значения, которое для листов автомобильного сортамента составляет 2 % от номинальной толщины.

Окончательные значения шлифовочных выпуклостей принимали с учетом возможности частичной компенсации разности между фактической выпуклостью и требуемой по условию плоскостности с помощью системы гидроизгиба рабочих валков.

В результате для промышленных испытаний приняли значение шлифовочных выпуклостей опорных валков, не имеющих скосов, $\Delta D_{ш.оп} = 0,6$ мм, а шлифовочные выпуклости рабочих валков выполняли в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Шлифовочные выпуклости рабочих валков, в зависимости от ширины полосы и межперевалочной кампании валков $\Delta D_{ш.р}$, мм

Ширина полосы, мм	Менее 1100	1100-1280	Свыше 1280
Начало кампании опорных валков	+0,1	-0,05	-0,1
Конец кампании опорных валков	+0,2	+0,2	+0,2

Как видно из табл. 1, при прокатке полос шириной более 1100 мм в начале кампании опорных валков без скосов требуются рабочие валки с вогнутой профилировкой. По мере износа опорных валков вогнутость уменьшают и в конце их кампании используют рабочие валки с выпуклостью 0,2 мм.

Промышленные испытания новых профилировок и их влияния на шероховатость холоднокатаных полос производили в пятой клетке стана 1700 в течение 3^х месяцев – с ноября 2010 г. по январь 2011 г. За этот период в клетке отработали 4 межперевалочные кампании опорных валков. Нарabотка за кампанию, в зависимости от качества материала валков и сложности сортамента, составила от 30 тыс. т до 50 тыс. т. В конце кампании первоначальная выпуклость бочек опорных валков уменьшалась за счет износа до 0-0,15 мм.

Основные результаты испытаний выпуклых опорных валков без скосов по краям бочки состояли в следующем.

1. Вненормативная шероховатость с показателем $R_a > 1,9$ мкм на поверхности прикомочных участков полос шириной более 1400 мм исчезла сразу же после установки в пятую клетку опорных валков с новой профилировкой. От начала и до

конца кампании опорных валков показатель R_a по всей ширине полос находился в диапазоне 1,5-1,8 мкм, разница значений R_a в средней части и вблизи кромок не превышала 0,2-0,23 мкм, светлые полосы в прикромочных участках исчезли, т.е. широкие листы автомобильного сортамента стали полностью удовлетворять по шероховатости техническим условиям автомобильных заводов.

2. Увеличение отсортировки металла по неплоскостности и другим дефектам в период испытаний не наблюдалось, в том числе – при производстве листов минимальной толщины (до 0,28 мм) и ширины (990-1015 мм).

На основании результатов промышленных испытаний выпуклые профилировки опорных валков без скосов на пятой клети пятиклетевого стана 1700 и измененные выпуклости (вогнутости) рабочих валков были приняты к использованию в производстве.

Применение новой методики для расчета профилировок рабочих валков чистой группы стана 2000. Еще одним результатом разработанной методики стало внедрение на стане горячей прокатки 2000 ОАО «Северсталь» скорректированных вогнутых профилировок валков чистой группы, обеспечивающих выполнение жестких требований к поперечному профилю горячекатаного подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента – поперечная выпуклость горячекатаного подката не должна превышать 1 % от средней толщины полосы.

Значения профилировочной вогнутости рабочих валков чистовых клетей стана 2000 не были привязаны к конкретным маркам сталей, ширинам и толщинам прокатываемых полос, следовательно, они являлись эмпирическими, усредненными для всего сортамента стана. Исходя из этого, корректировка профилировок была выполнена усредненной, чтобы не увеличивать число перевалок и перешлифовок валков.

Значения профилировок рабочих валков чистой группы стана 2000, нормированные существующей технологической инструкцией и рекомендуемые значения откорректированных вогнутостей рабочих валков, приведены в табл. 2 (все профилировки вогнутые).

Таблица 2

Значения шлифовочной вогнутости в середине бочки рабочих валков чистовых клетей стана 2000

№ клети	6	7	8	9	10	11	12
Величина вогнутости по существующей технологии, мм	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,2 0,15	0,2 0,15
Рекомендуемая величина вогнутости, мм	0,45	0,35	0,25	0,2	0,18	0,18 0,13	0,18 0,13

Сопоставление данных табл. 2 показывает, что вогнутости рабочих валков в 6-9 клетях были уменьшены на 0,05 мм, а в остальных клетях на 0,02 мм, т.е. на 10-13 % по сравнению с существующей технологией.

Указанные мероприятия, совместно с корректировкой межклетевых удельных натяжений в чистой группе клетей стана 2000, позволили снизить значение поперечной разнотолщинности горячекатаных полос толщиной 2,0-6,0 мм, из которых прокатывают полосы автомобильного сортамента толщиной 0,6-2,0 мм, с 0,04-0,1 мм до 0,02-0,06 мм без ухудшения их плоскостности.

В четвертой главе выполнено моделирование и исследование упругих деформаций шестивалковых клетей.

Общая упругая деформация валковой системы шестивалковой клетки в середине бочки валков определяет продольную разнотолщинность полосы и складывается (рис. 9) из упругого сжатия рабочих валков в зоне контакта с полосой $\delta_{п-р}$, упругого сжатия валков по контактам рабочий – промежуточный δ_1 и промежуточный – опорный δ_2 и прогиба опорного валка y_a относительно линий действия реакций опор:

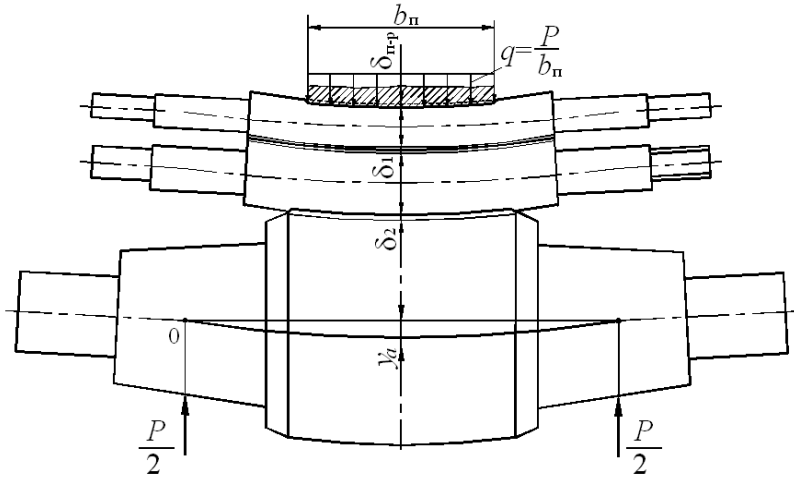


Рис. 9. Расчетная схема для определения упругой деформации валкового узла шестивалковой клетки в середине бочки

$$y_c = 2(\delta_{п-р} + \delta_1 + \delta_2 + y_a).$$

В предложенной расчетной схеме учтено, что длина бочки опорного валка может быть меньше длины бочек промежуточного и рабочего валков и возможно выполнение концевых скосов на бочке опорного валка.

Совместное упругое сжатие валков δ_1 , δ_2 и упругое сжатие рабочих валков в зоне контакта с полосой $\delta_{п-р}$ определяли с помощью формул Б.С. Ковальского для расчета деформаций сжатия (сближения осей) двух соприкасающихся цилиндров и цилиндра и плоскости. Прогиб опорного валка y_a определяли по теореме Кастильяно как сумму прогибов от действия изгибающих моментов и поперечных сил.

Для определения модуля жесткости клетки была использована формула

$$M_{кл} = \frac{P}{a_{кл}(y_c + y_{ст})},$$

где $y_{ст}$ – упругая деформация станины закрытого типа рабочей клетки, определяемая по формулам А.И. Целикова, $a_{кл}$ – коэффициент, учитывающий деформацию остальных деталей клетки, для листовых станков $a_{кл} = 1,5-1,7$.

Расчет упругих деформаций, действующих на поперечную разнотолщинность полосы, выполнен с учетом действия сил гидравлического изгиба на рабочие и промежуточные валки. Для определения прогиба валков от усилий гидроизгиба рассматривалась только половина длины валков с заделкой в середине бочки.

Поперечную разнотолщинность полосы в шестивалковой клетке определили по формуле:

$$\delta h_{\text{поп}} = 2(y_c - y_{\text{кр}} - y_{Q_p^{\text{пр}}} - y_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}} + y_{Q_p^{\text{доп}}} + y_{Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}}), \quad (1)$$

где y_c , $y_{\text{кр}}$ – деформации валковой системы посередине и по кромке полосы, $y_{Q_p^{\text{пр}}}$, $y_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}}$ и $y_{Q_p^{\text{доп}}}$, $y_{Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}}$ – прогибы рабочего и промежуточного валков от усилий противоизгиба и дополнительного изгиба в сечении, соответствующем кромке полосы (табл. 3), полученные с помощью теоремы Кастильяно. Так как формула (1) предназначалась для сопоставления эффективности регулирования профиля и формы полосы в шестивалковых и четырехвалковых клетях, в ней принят вариант цилиндрической профилировки валков и не учитывался их износ.

Таблица 3

Выражения прогибов рабочего и промежуточного валков шестивалковой клетки по кромке полосы при действии усилий противоизгиба

Рабочий валок	Промежуточный валок
1. Суммарный прогиб	
$y_{Q_p^{\text{пр}}} = y'_{Q_p^{\text{пр}}} + y''_{Q_p^{\text{пр}}}$	$y_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}} = y'_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}} + y''_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}}$
2. Прогиб от действия изгибающих моментов	
$y'_{Q_p^{\text{пр}}} = \frac{Q_p^{\text{пр}}}{3E_p J_{\delta_p}} (m_p^3 - c_p^3) -$ $- \frac{q_1}{24E_p J_{\delta_p}} (3m_p^4 - c_p^4 + 2m_p^2 c_p (3c_p - 4m_p)) +$ $+ \frac{q}{24E_p J_{\delta_p}} (m_p^4 - 3c_p^4 + 2m_p c_p^2 (4c_p - 3m_p))$	$y'_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}} = \frac{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}}{3E_{\text{пр}} J_{\delta_{\text{пр}}}} (m_{\text{пр}}^3 - c_{\text{пр}}^3) +$ $+ \frac{q_1}{24E_{\text{пр}} J_{\delta_{\text{пр}}}} (3m_{\text{пр}}^4 - c_{\text{пр}}^4 + 2m_{\text{пр}}^2 c_{\text{пр}} (3c_{\text{пр}} - 4m_{\text{пр}})) -$ $- \frac{q_2}{24E_{\text{пр}} J_{\delta_{\text{пр}}}} (3m_{\text{пр}}^4 - 3c_{\text{пр}}^4 + 2m_{\text{пр}}^2 n_{\text{оп}} (3n_{\text{оп}} - 4m_{\text{пр}})) +$ $+ 2c_{\text{пр}}^2 n_{\text{оп}} (4c_{\text{пр}} - 3n_{\text{оп}})$
3. Прогиб от действия поперечных сил	
$y''_{Q_p^{\text{пр}}} = \frac{Q_p^{\text{пр}}}{G_p F_{\delta_p}} (m_p - c_p) - \frac{q_1 + q}{2G_p F_{\delta_p}} (m_p - c_p)^2$	$y''_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}} = \frac{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}}{G_{\text{пр}} F_{\delta_{\text{пр}}}} (m_{\text{пр}} - c_{\text{пр}}) + \frac{q_1}{2G_{\text{пр}} F_{\delta_{\text{пр}}}} (m_{\text{пр}} - c_{\text{пр}})^2 -$ $- \frac{q_2}{2G_{\text{пр}} F_{\delta_{\text{пр}}}} (m_{\text{пр}}^2 - c_{\text{пр}}^2 + 2n_{\text{оп}} (c_{\text{пр}} - m_{\text{пр}}))$

В табл. 3 приняты следующие обозначения: q – распределение силы прокатки по ширине полосы; q_1 и q_2 – распределения межвалковой контактной силы по длине активной образующей бочки рабочего или промежуточного и опорного валков; c_p , $c_{\text{пр}}$, $n_{\text{оп}}$ – расстояния от точки приложения силы гидроизгиба до края активной части бочки рабочего, промежуточного и опорного валков; $m_p = \frac{a_p - b_p}{2}$ и $m_{\text{пр}} = \frac{a_{\text{пр}} - b_{\text{пр}}}{2}$, где a_p и $a_{\text{пр}}$ – расстояния между точками приложения сил гидроизгиба рабочего и промежуточного валков; E_p , $E_{\text{пр}}$ и G_p , $G_{\text{пр}}$ – модули упругости и сдвига материала

рабочих и промежуточных валков; J_{δ_p} , $J_{\delta_{np}}$ и F_{δ_p} , $F_{\delta_{np}}$ – моменты инерции и площади сечений бочек рабочего и промежуточного валков. При дополнительном изгибе в выражениях п. 2 и п. 3 Q_p^{np} и Q_{np}^{np} заменяют соответственно на $Q_p^{доп}$ и $Q_{np}^{доп}$ со знаком «минус».

Выражения прогибов рабочего валка от усилий гидроизгиба четырехвалковой клетки приведены в диссертации.

Поскольку на заводах черной металлургии в России действующие шестивалковые клетки отсутствуют, достоверность результатов моделирования проверяли двумя методами. Первый – сравнением результатов с опубликованными результатами зарубежных авторов. В табл. 4 представлено сравнение упругих деформаций узлов клеток при усилии прокатки 25 МН.

Таблица 4

Значения упругих деформаций узлов шестивалковых и четырехвалковых клеток по данным зарубежных авторов и рассчитанные по модели

Элементы клетки и показатели ее упругой деформации	Шестивалковая клеть				Четырехвалковая клеть			
	Данные работы ¹	Расчетные значения		Расхождение, %	Данные работы ¹	Расчетные значения		Расхождение, %
		Вариант 1	Вариант 2			Вариант 1	Вариант 2	
Валковый узел, мм	3,67 – 4,003	3,849	3,676	0/0	2,496 – 2,729	2,686	2,511	0/0
Станина клетки, мм	0,966	0,984	0,879	1,8/9,9	0,909	0,847	0,946	7,3/3,9
Суммарная упругая деформация клетки, мм	5,168 – 7,69	7,25	6,833	0/0	3,937 – 5,649	5,3	5,186	0/0
Жесткость клетки, МН/мм	3,25 – 4,84	3,448	3,659	0/0	4,43 – 6,35	4,717	4,821	0/0

В расчетных значениях ширина полосы равна 1000 мм, первый вариант получен для шестивалковых клеток с $D_p = 420$ мм; $D_{np} = 520$ мм; $D_{оп} = 1300$ мм и для четырехвалковых – $D_p = 420$ мм; $D_{оп} = 1400$ мм; второй вариант для шестивалковых клеток – $D_p = 470$ мм; $D_{np} = 580$ мм; $D_{оп} = 1450$ мм и для четырехвалковых – $D_p = 470$ мм; $D_{оп} = 1550$ мм. В первом и во втором вариантах длины бочек валков шестивалковых клеток $L_p = L_{оп} = 1880$ мм; $L_{np} = 2120$ мм и четырехвалковых клеток $L_p = 2080$ мм; $L_{оп} = 1880$ мм. В расчетах принималось, что отношение диаметра шейки к диаметру бочки опорного валка равно $d_{ш,оп}/D_{оп} = 0,6$; ширина окна станины $B_{ок} = 1,1D_{оп}$; высота окна станины в шестивалковой клетке и четырехвалковой равна соответственно $H_{ок_6} = 3,1(D_p + D_{np} + D_{оп})$; $H_{ок_4} = 3,1(D_p + D_{оп})$.

¹ Design and performance of tandem cold-rolling mills with 6-high and 4-high technology / Seilinger A., Nopp G., Finstermann G., Djumlija G. // Труды 9-ой Международной и 4-ой Европейской конфер. "Steel Rolling 2006". – Париж, 2006.

Расхождение результатов расчета с опубликованными данными находится в диапазоне 0-10%.

Второй метод проверки был осуществлен с помощью численного эксперимента: путем сравнения результатов моделирования аналитическим методом и численным методом в САЕ-системе. Расхождение результатов проверки аналитических формул численным экспериментом не превысило 8%.

Приведенные данные свидетельствуют о достоверности разработанных расчетных методик и их пригодности для сравнения эффективности четырехвалковых и шестивалковых клетей при регулировании показателей точности прокатываемых полос.

Для компьютерного моделирования упругих деформаций были приняты конструкции шестивалковой клетки с вариантом соотношения диаметров бочек валков: $D_{оп}/D_p = 7,5$; $D_{оп}/D_{np} = 3,3$ ($D_p = 200$ мм, $D_{np} = 450$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм) и четырехвалковой клетки с теми же соотношением диаметров: $D_{оп}/D_b = 7,5$ ($D_b = 200$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм).

Сопоставление показало, что жесткость четырехвалковой клетки на 25% больше жесткости шестивалковой клетки. Уменьшение жесткости шестивалковой клетки объясняется упругим сплющиванием промежуточного валка и увеличением размеров станины. Однако в шестивалковой клетки диапазон воздействия на поперечный профиль полосы в 3,5 раза больше, чем в четырехвалковой, благодаря возможности осуществить гидроизгиб не только рабочих, но и промежуточных валков.

Таким образом, шестивалковые клетки более целесообразно использовать, если требуется производить холоднокатаные полосы толщиной 0,1-0,2 мм, в том числе из высокопрочных легированных сталей; и при этом выполнять самые жесткие требования к допускам по толщине и неплоскостности холоднокатаных полос.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполнены исследования профилировок и упругих деформаций валков рабочих клетей листовых станов и развитие методов их моделирования с целью совершенствования технологии прокатки широких полос и улучшения их качества.

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. Исходя из тенденций развития технологии и оборудования листовых станов, обоснована актуальность развития методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков рабочих клетей этих станов, в том числе шестивалковых, для повышения точности прокатываемых полос в части поперечной разнотолщинности и плоскостности, а также для уменьшения расхода валков.

Выполнено упорядочение терминологии, относящейся к понятиям «профилировка валков», «упругая деформация валков».

2. Разработан новый метод моделирования шлифовочных профилировок валков листовых станов, впервые использующий САЕ-систему, основанную на методе конечных элементов, и учитывающий упругие деформации, тепловые профили, неравномерный износ по длине бочки и требуемые показатели точности прокатываемых полос.

Моделирование новым методом позволило построить шлифовочные профилировки рабочих и опорных валков в виде непрерывных, плавно сопрягающихся кривых по длине бочки, что значительно снизило неравномерность контактных напряжений, обжатий и вытяжек по ширине полосы и по длине бочек валков, дало

возможность получать листовой прокат с минимальной поперечной разнотолщинностью, а также уменьшить расход валков.

3. Разработан усовершенствованный метод моделирования упругих деформаций валков листовых станов, основанный на трехмерной конечно-элементной модели валкового узла, отличающийся от известных методов тем, что в модель включены подшипниковые опоры с подушками и контактирующие с ними поверхности узла станин, при этом условия контактного взаимодействия подушек со станинами максимально приближены к реальным.

4. С применением нового метода моделирования разработаны, испытаны и внедрены в производство на широкополосных станах 2000 горячей прокатки и 1700 холодной прокатки усовершенствованные профилировки валков, существенно улучшившие качество горячекатаных и холоднокатаных полос.

Для толстолиствого стана 5000 разработана и принята к внедрению принципиально новая профилировка опорных валков, исключающая их преждевременные поверхностные разрушения.

5. Разработан отсутствовавший ранее аналитический метод расчета упругих деформаций шестивалковых клетей, с применением которого выполнен сопоставительный анализ жесткости шестивалковой и четырехвалковой клетей и их эффективности при регулировании показателей точности прокатываемых полос, в результате сформулированы требования к сортаменту холоднокатаных полос, при производстве которых шестивалковые клетки использовать более целесообразно, чем четырехвалковые.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гарбер, Э.А. Влияние профилировок рабочих и опорных валков на шероховатость поверхности широких холоднокатаных автомобильных листов / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева, С.И. Павлов, Н.Л. Болобанова, В.Ю. Антонов, И.А. Дятлов // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 9-13.

2. Гарбер, Э.А. Исследование и устранение сверхнормативной шероховатости поверхности прикромочных участков широких холоднокатаных полос / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева, С.И. Павлов, Н.Л. Болобанова, В.Ю. Антонов, И.А. Дятлов // Вестник ЧГУ. – Череповец: ЧГУ. – 2011. – № 4. Том 2. – С. 5-8.

3. Гарбер, Э.А. Моделирование упругих деформаций шестивалковых клетей и определение их конструктивных параметров, обеспечивающих повышение точности холоднокатаных полос / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Производство проката. – 2012. – № 1. – С. 17-28.

4. Гарбер, Э.А. Профилирование валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Производство проката. – 2012. – № 3. – С. 6-10.

5. Гарбер, Э.А. Моделирование жесткости шестивалковых клетей с целью повышения точности холоднокатаных полос / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова, А.И. Трайно // Металлы. – 2012. – № 2. – С. 55-68.

6. Гарбер, Э.А. Применение метода конечных элементов для расчета профилировок валков широкополосных станов / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова, А.И. Трайно // Металлы. – 2012. – № 3. – С. 19-24.

7. Гарбер, Э.А. Совершенствование метода моделирования упругих деформаций валков клетки кварто и их влияния на поперечный профиль широких полос / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Производство проката. – 2012. – № 12. – С. 14-18.

8. Гарбер, Э.А. Моделирование и уменьшение неплоскостности полос при горячей прокатке на стадии настройки широкополосного стана / Э.А. Гарбер, П. А. Мишнев, Д.Л. Шалаевский, Р.Б. Палигин, И.А. Михеева, Н.Л. Болобанова // Производство проката. – 2014. – № 3. – С. 7-13.

Прочие публикации:

1. Гарбер, Э.А. Моделирование шлифовочных профилировок валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Всероссийский научный семинар «Научно-технический прогресс в металлургии». – Череповец: ЧГУ. – 2011. – С. 1-11.

2. Гарбер, Э.А. Совершенствование методики расчета упругих деформаций валковой системы клетки «кварто» для повышения точности выполнения поперечного профиля широких полос / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. труд. Часть II. – Липецк: Из-во ЛГТУ, 2012 г. – С. 3-8.

3. Garber, E.A. Simulation of the Six-High Stand Stiffness to Increase the Accuracy of Cold-Rolled Strips / E.A.Garber, N.L. Bolobanova, A.I. Traino // Russian Metallurgy. – Vol. 2012. – No. 3. – P. 215-226.

4. Garber, E.A. Use of a Finite Element Method to Calculate Roll for Broad-Strip Mills / E.A.Garber, N.L. Bolobanova, A.I. Traino // Russian Metallurgy. – Vol. 2012. – No. 5. – P. 370-374.

5. Гарбер, Э.А. Повышение точности моделирования поперечной разнотолщинности широких полос с использованием метода конечных элементов / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2012. – № 12. – С. 50-53.

6. Гарбер, Э.А. Особенности моделирования упругих деформаций валков клетки «кварто» методом конечных элементов, обеспечивающие повышение точности расчета поперечного профиля полосы / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Материалы Международного научного семинара «Научно-технический прогресс в металлургии – 2012». – Череповец: ЧГУ. – 2012. – С. 138-145.

7. Болобанова, Н.Л. Развитие метода конечных элементов для повышения точности моделирования упругих деформаций, профилировок валков и поперечного профиля полосы на широкополосных станах / Н.Л. Болобанова // Материалы I Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2013». – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 37-43.

8. Болобанова, Н.Л. Компьютерное моделирование процессов и оборудования металлургического производства. Учебное пособие. / Н.Л. Болобанова – Череповец: ЧГУ, 2014. – 91 с.

9. Кожевникова, И. А. Сопоставительный анализ точности расчета усилия горячей прокатки аналитическим методом и методом конечных элементов / И.А. Кожевникова, Н.Л. Болобанова // Сборник научных трудов «Обработка материалов давлением». – Краматорск: ДГМА. – 2011. – №4. – С. 30-37.