

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЧЕРЕПОВЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Гарбер Э.А.

Череповец – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Литературно-аналитический обзор известных методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов	13
1.1. Анализ известных методик расчета шлифовочных профилировок валков	13
1.2. Анализ известных методов моделирования упругих деформаций валков листовых станов	21
1.3. Анализ форм кривых теплового профиля и упругих деформаций рабочего валка	24
1.4. Анализ шлифовочных профилировок валков, применяемых на практике в листопрокатных цехах	27
1.5. Проблема развития методологии расчета валковых систем рабочих клеток широкополосных станов	29
Выводы по главе 1	35
Глава 2. Разработка новых методов моделирования шлифовочных профилировок и упругих деформаций валков листовых станов	39
2.1. Основные принципы создания новой конечно-элементной модели узла валков клетки «кварто» [59-67].....	39
2.2. Первые результаты моделирования упругих деформаций валков	45
2.3. Исследование шлифовочной профилировки валков с помощью разработанной модели	49
2.4. Разработка нового метода профилирования опорных валков толстолиствого стана 5000	56
Выводы по главе 2	68

Глава 3. Применение нового метода моделирования профилировок валков для усовершенствования технологии листовых станов	70
3.1. Применение новой методики расчета профилировок валков для улучшения качества холоднокатаных полос	70
3.2. Применение новой методики для расчета профилировок рабочих валков чистовой группы стана 2000	76
Выводы по главе 3.....	79
Глава 4. Моделирование и исследование упругих деформаций шестивалковых клетей.....	80
4.1. Техническая характеристика шестивалковых клетей и проблема оценки областей их эффективного использования	80
4.2. Разработка аналитического метода расчета упругих деформаций шестивалковой клетки	84
4.2. Оценка достоверности результатов моделирования упругих деформаций и жесткости четырех- и шестивалковых клетей	100
4.3. Результаты моделирования упругих деформаций четырех- и шестивалковых клетей	104
Выводы по главе 4.....	108
Заключение	110
Литература	112
Приложение	121

Введение

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 усовершенствования 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 в последние годы в отделениях подготовки валков листопрокатных цехов вводятся в действие вальцешлифовальные станки с числовым программным управлением, которые позволяют выполнить кривую шлифовочной профилировки любой необходимой формы, не увеличивая трудоемкость шлифовки.

Опыт шлифовочного профилирования в виде непрерывной кривой по длине бочки нами обнаружен только для опорного валка – в виде технического решения, оформленного патентом Российской Федерации*. Согласно этому патенту, шлифовочная профилировка опорного валка задана в виде трех кривых, выраженных разными аналитическими зависимостями от выпуклости (вогнутости) и износа в середине бочки рабочего валка, длины бочки, максимальной и минимальной ширины прокатываемых полос. Строгое обоснование того, что такая профилировка обеспечивает минимальную неравномерность контактных напряжений по длине бочки и ширине полосы, в описании к указанному патенту отсутствует.

Между тем имеется эффективный инструмент решения задач 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).

* Патент РФ 2222393, кл. В 21 В 27/02, 2004

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 клетки, в которой между рабочим и опорным валками установлен промежуточный валок.

Шестивалковые клетки начали применять в конце 80-х годов XX века на некоторых зарубежных заводах. К решению об установке этих клеток 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 клеток с такими валками комплексом систем регулирования планшетности.

Клетки с рабочими валками столь малого диаметра конструктивно удобнее выполнить с промежуточными валками, через которые осуществить их главный привод. Преимущество этих клеток, 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 клетки значительно дороже в изготовлении и эксплуатации, чем четырехвалковые. Чтобы объективно определить диапазоны профилируемых и марок стали, когда целесообразно использовать шестивалковую клетку, а когда – можно обойтись клетью «кварто», необходимо иметь математическую модель упругих деформаций шестивалковых клеток. Актуальность ее разработки возросла в связи с тем, что на металлургических предприятиях России прорабатывают вопрос о вводе в действие шестивалковых клеток.

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, теплового 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.

Так, подавляющее большинство публикаций, касающихся расчета *шлифовочной профилировки валков*, не содержит метода ее построения в виде непрерывной кривой по длине бочки, использующего современную компьютерную технологию, реализованную в виде САЕ-системы.

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 [1-4], 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 клеток 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 клеток 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 прокатываемых 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 САД/САЕ. 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 САЕ-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.

1. Литературно-аналитический обзор известных методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов

1.1. Анализ известных методик расчета шлифовочных профилировок валков

В подавляющем большинстве публикаций, посвященных шлифовочным профилировкам валков, рассматривается не распределение шлифовочного профиля по длине бочки, а выпуклость (вогнутость) в середине бочки (разность диаметров в середине и у торца).

Авторами работы [1] было предложено выражение для определения необходимой шлифовочной выпуклости или вогнутости каждого рабочего валка в середине бочки, наиболее полно учитывающее заданные параметры режима прокатки:

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = (2y_{\text{р+оп}} + y_{\text{изн.оп}} + \delta_{\text{спл}}) - \left[2\Delta_{\text{Тр}}^{0-L} + \Delta_{\text{Топ}}^{0-L} - \delta_{\text{п}} \frac{h_1}{h_0} \left(\frac{L}{b} \right)^2 \right], \quad (1.1)$$

где $y_{\text{р+оп}}$ – полный прогиб одного рабочего валка (включая прогиб опорного валка и «собственный прогиб» рабочего валка относительно опорного); $y_{\text{изн.оп}}$ – максимальная величина износа в середине бочки одного опорного валка (на диаметр) в момент установки вновь отшлифованного рабочего валка; $\delta_{\text{спл}}$ – величина неравномерности сплющивания одного рабочего валка в контакте с полосой (разность сплющивания) в середине и у края бочки); $\Delta_{\text{Тр}}^{0-L}$, $\Delta_{\text{Топ}}^{0-L}$ – средние значения тепловых выпуклостей рабочего и опорного валков на длине бочки при прокатке; $\delta_{\text{п}}$ – требуемая поперечная разнотолщинность подката; h_0 , h_1 – толщина полосы на входе и выходе из клетки; L – длина бочки рабочего валка; b – ширина прокатываемой полосы.

Сомножитель $(L/b)^2$ учитывает то обстоятельство, что $\Delta D_{\text{шл.р}}$ задают для всей длины бочки, а $\delta_{\text{п}}$ относится только к ширине полосы.

Уточненная формула профилировки валков, основанная на методике, изложенной в [1], приведена в работах [5, 6]:

$$\Delta D_{\text{шл.р.сум.}} = (L_p / L_{\text{оп}})^2 (2y_{\text{оп}} - \Delta D_{\text{шл.оп.}} + \Delta D_{\text{изн.оп.}} - \Delta D_{\text{т.оп}} + 2\Delta_{\text{спл.оп.}}) + (L_p / b)^2 (2\Delta_{\text{спл.р.}} - \delta_{j-1} (h_j / h_{j-1})) - 2\Delta D_{\text{т.р.}}, \quad (1.2)$$

где $\Delta D_{\text{шл.р.сум.}}$ – суммарная шлифовочная выпуклость пары рабочих валков в середине бочки; L_p и $L_{\text{оп}}$ длины бочек рабочего опорного валков; $y_{\text{оп}}$ – прогиб оси опорного валка на длине $L_{\text{оп}}$; $\Delta D_{\text{шл.оп}}$ – шлифовочная выпуклость опорного валка (разность диаметров в середине и у края бочки); $\Delta D_{\text{изн.оп}}$ – уменьшение выпуклости за счет износа бочки опорного валка на момент установки в клеть вновь отшлифованных рабочих валков (разность износов в середине и у краев бочки опорного валка); $\Delta D_{\text{т.оп}}$ – тепловая выпуклость опорного валка на длине бочки без учета скосов; $\Delta D_{\text{т.р.}}$ – тепловая выпуклость рабочего валка на длине бочки; $\Delta_{\text{спл.р.}}$ – неравномерность сплющивания рабочего валка в контакте с полосой на её ширине b ; $\Delta_{\text{спл.оп.}}$ – неравномерность межвалкового сплющивания на длине $L_{\text{оп}}$; $\delta_{j-1} = h_{(j-1)\text{с}} - h_{(j-1)\text{к}}$ – поперечная разнотолщинность полосы на входе в j -ю клеть; $h_{(j-1)\text{с}}$, $h_{(j-1)\text{к}}$ – толщины полосы в середине и у боковой кромки на входе в j -ю клеть; h_{j-1} , h_j – номинальные (согласно заданному режиму прокатки) толщины полосы на входе и выходе из j -й клетки.

Особенности применения уравнения (1.2) следующие:

1. При использовании той или иной профилировки валков необходимо поддерживать режимы, для которых эта профилировка была рассчитана. Отклонения от расчетных режимов можно в ограниченных пределах скомпенсировать перераспределением охлаждения валков.

2. Расчетная шлифовочная профилировка валков линейно зависит от заданной поперечной разнотолщинности полосы на входе в клеть (δ_{j-1}), поэтому, если фактическая величина δ_{j-1} будет отличаться от той, которая была задана в уравнении (1.2), то принятая профилировка не обеспечит

прокатки планшетной полосы. Следовательно, при внедрении расчетной профилировки валков необходим контроль поперечного профиля подката.

3. Величина заданной шлифовочной выпуклости рабочих валков зависит от принятой шлифовочной выпуклости опорных валков. Из уравнения (1.2) видно, что, если увеличить шлифовочную выпуклость каждого опорного валка $\Delta D_{ш.оп.}$, например, на 0,5 мм, то шлифовочная выпуклость пары рабочих валков соответственно уменьшится на $0,5(L_p/L_{оп})^2$ мм. Следовательно, согласно уравнению (1.2), передаточный коэффициент от шлифовочного профиля опорных валков к шлифовочному профилю рабочих валков для выполнения условия прокатки планшетной полосы должен быть равен:

$$\frac{\delta(\Delta D_{ш.р.сум})}{\delta(\Delta D_{ш.оп.сум})} = -0,5(L_p / L_{оп})^2. \quad (1.3)$$

где $\delta(\Delta D_{ш.р.сум})$ – приращение шлифовочной выпуклости рабочих валков, необходимое для компенсации приращения шлифовочной выпуклости опорных валков, равной $\delta(\Delta D_{ш.оп.сум})$.

Знак «минус» в выражении (1.3) показывает, что рост величины $\delta(\Delta D_{ш.оп.сум})$ требует уменьшения величины $\Delta D_{ш.р.сум}$. Если величина $\Delta D_{ш.р.}$ (или $\Delta D_{ш.р.сум}$) в результате расчета по формуле (1.3) окажется отрицательной, это значит, что профилировка рабочих валков должна выполняться вогнутой.

4. По мере износа опорных валков (т.е. роста величины $\Delta D_{изн.оп.}$), шлифовочную выпуклость рабочих валков необходимо увеличить, при этом, согласно уравнению (1.3), передаточный коэффициент составит:

$$\frac{\delta(\Delta D_{ш.р.сум})}{\delta(\Delta D_{изн.оп.})} = +0,5(L_p / L_{оп})^2.$$

При этом целесообразно учитывать то, что колебания профиля каждого рабочего валка диапазоном до 0,05 мм могут быть скомпенсированы секционным охлаждением.

Уравнение (1.2) применяется для каждой рабочей клетки непрерывного стана, поэтому, в зависимости от сортамента и режима прокатки, на разных клетях обычно используют валки с различными шлифовочными выпуклостями.

Недостатком выражения (1.2), помимо того, что оно не предусматривает моделирования профилировки в виде кривой по длине бочки, является то, что она не учитывает влияния гидроизгиба валков, хотя его можно учесть при определении упругой деформации рабочего валка.

В работе [7] предлагается сначала определять индивидуальные шлифовочные выпуклости или вогнутости рабочих валков для каждой клетки по всему сортаменту, а потом выполнить их усреднение для выполнения станочной профилировки рабочих валков. При расчете индивидуальных шлифовочных профилировок следует исходить из того, что в отсутствии тепловой выпуклости профилировка должна полностью компенсировать прогиб и обеспечивать тем самым равенство вытяжек по ширине полосы

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = f_L^P - \frac{a}{b} h, \quad (1.4)$$

где $\Delta D_{\text{шл.р}}$ – суммарная шлифовочная выпуклость пары рабочих валков в середине бочки; f_L^P – стрела прогиба пары рабочих валков; $a = \frac{\delta H_0}{H_0}$, δH_0 – поперечная разнотолщинность полосы на входе в клеть, H_0 – номинальная (согласно заданному режиму прокатки) толщина полосы на входе в клеть; $b = (B/L)^2$, B – ширина полосы; h – толщина полосы на выходе из клетки; L – длина бочки валка.

Далее исследуются полученные значения выпуклостей (вогнутостей) рабочих валков с целью их усреднения по всему сортаменту или по группе типоразмеров. Усреднение шлифовочных выпуклостей основано на том, что тепловой выпуклостью можно компенсировать недостаток профилировки, т.е. шлифовочную выпуклость следует выбирать меньшей из всех, полученных для рассматриваемых групп типоразмеров проката

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = \min_{i \in [1:N]} \Delta D_{\text{шл.р}_i}, \quad (1.5)$$

где N – число индивидуальных профилировок.

Тогда весь диапазон разброса профилировок, компенсация которого должна обеспечиваться тепловой выпуклостью, составит

$$\Delta_p = \max_{i \in [1:N]} \Delta D_{\text{шл.р}_i} - \min_{i \in [1:N]} \Delta D_{\text{шл.р}_i}. \quad (1.6)$$

При усреднении профилировок необходимо принимать во внимание износ, который может достигать существенных значений и должен компенсироваться также тепловой выпуклостью. Максимальный диапазон изменения тепловой выпуклости должен составить

$$\Delta D_{t \text{ max}} \geq \Delta_p + \Delta u_{\text{из}}, \quad (1.7)$$

где $\Delta u_{\text{из}}$ – разность между величиной износа по середине и краям за кампанию службы валков.

Если для получения необходимого значения $\Delta D_{t \text{ max}}$ требуется нереализуемый практически перепад температур, то количество шлифовочных профилировок, отличающихся разными выпуклостями, следует увеличить. Задаваясь допустимым значением разности температур по длине бочки рабочего валка Δt_p , находят соответствующую ей тепловую выпуклость $\Delta D_{t p}$. Формула для определения минимально возможного количества профилировок:

$$n = E \left(\frac{\Delta_p}{\Delta D_{t p} - \Delta u_{\text{из}}} \right), \quad (1.8)$$

где E – округление числа в скобках до ближайшего большего целого.

Принимая износ валков за кампанию постоянным по клетям стана и равным максимальному, значения станочных выпуклостей для n минимально возможного количества профилировок можно определить по формуле:

$$\Delta D_{\text{ст.р}_k} = \min \Delta D_{\text{шл.р}_i} + \frac{\Delta_p}{n} (k - 1), \quad (1.9)$$

где $k = 1, \dots, n$ – номер профилировки.

После определения станочных выпуклостей рабочих валков типоразмеры прокатываемых полос объединяют в группы так, чтобы все полосы группы прокатывалась на одних и тех же сочетаниях комплектов валков, т. е. в группу объединяют такие типоразмеры, значения индивидуальных шлифовочных выпуклостей которых по клетям не меньше выбранных станочных и не больше, чем станочная плюс разность $(\Delta D_{t\text{ п}} - \Delta u_{\text{из}})$.

Недостатком модели, описываемой выражениями (1.4)-(1.9), является отсутствие в ней учета шлифовочной и тепловой выпуклостей опорного вала.

В работе [8] предложено величину суммарной выпуклости или вогнутости в середине бочки рабочих валков определять по формуле

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = k_{\text{в}} \delta_{\text{н}} (L/B)^2 + R_t^{\text{в}} + R_t^{\text{н}} - y_L^{\text{в}} - y_L^{\text{н}}, \quad (1.10)$$

$R_t^{\text{в}}$, $R_t^{\text{н}}$ – тепловая выпуклость (на радиус) верхнего и нижнего рабочих валков; $y_L^{\text{в}}$, $y_L^{\text{н}}$ – прогиб верхнего и нижнего рабочих валков. Методика определения y_L должна учитывать значения фактического профиля вала. Коэффициент $k_{\text{в}}$, характеризующий удерживающую способность клетки, определяют экспериментальным путем, $k_{\text{в}} = 0 - 0,2$ для непрерывных станов горячей и холодной прокатки; B – ширина полосы; L – длина бочки вала; значение технологически необходимой вогнутости валков $\delta_{\text{н}}$ принимается равным $0,1 - 0,15$ мм или определяется как $\Delta D_{\text{шл.н}}(B/L)^2$. Величину вогнутости профиля рабочих валков $\Delta D_{\text{шл.н}}$, необходимую для центрирования раската на оси прокатки, можно определить по уравнению

$$\Delta D_{\text{шл.н}} = \frac{2Px^2}{A_{\text{н}}^2 M_{\text{ст}}}, \quad (1.11)$$

где P – усилие прокатки в клетях; x – текущая координата вдоль бочки валков; $A_{\text{н}}$ – расстояние между осями нажимных винтов; $M_{\text{ст}}$ – модуль жесткости станины клетки без валков.

Расчет профилировки рабочих валков производят методом итерации, так как в результате первого расчета величина $\Delta D_{\text{шл.р}}$ изменит контактные межвалковые условия, что повлияет на y_L , т. е. и на $\Delta D_{\text{шл.р}}$. В связи с этим

расчет вогнутости рабочего валка продолжают до тех пор, пока не будет достигнута заданная величина точности расчета $\varepsilon \geq \left| \Delta D_{\text{шп.р } N-1} - \Delta D_{\text{шп.р } N} \right|$ (N – номер приближения).

Проверку условия получения листов и полос без нарушения плоскостности производят при $B/h_i > 80$. Для этой цели определяют величину разности вытяжек

$$\Delta\mu = \frac{(h_{i-1} + \delta_{i-1})/(h_i + \delta_i) - h_{i-1}/h_i}{(h_{i-1} + \delta_{i-1})/(h_i + \delta_i)}, \quad (1.12)$$

и сравнивают с критерием нарушения $\Delta\mu_{\text{кр}}$, значения которого вычисляются для случая прокатки тонких полос по уравнению

$$\Delta\mu_{\text{кр}} = 2,95(h_i / B)^{1,13}. \quad (1.13)$$

Здесь h_{i-1} и h_i – толщина полосы на входе в валки и на выходе из валков; δ_{i-1} и δ_i – поперечная разнотолщинность до и после прокатки в клетки.

Если $|\Delta\mu| > \Delta\mu_{\text{кр}}$, то корректировку осуществляют тремя путями: изменением выпуклости или вогнутости в середине бочки рабочих валков, изменением режима обжатий, противоизгибом рабочих валков.

Точность модели (1.10)-(1.13) существенно зависит от правильного определения величины упругих деформаций. Предлагаемое в работе [5] уравнение определения упругой деформации для практических расчетов использовать затруднительно, в связи со сложностью определения входящих в него факторов. Кроме того, в методике ничего не говорится о возможности усреднения профилировок по всему сортаменту или группе типоразмеров полос.

В работе [9] приводится уравнение поперечной разнотолщинности полосы

$$\frac{\Delta h_{\text{поп}}}{2} = \Delta y_b - \delta R_b - f_b, \quad (1.14)$$

где Δy_b – прогиб оси рабочего валка на ширине полосы; δR_b – изменение радиуса рабочего валка от изгибающего момента на ширине полосы; f_b –

размер профиля бочки на ширине полосы. Применение для определения Δu_b и δR_b сложного математического аппарата в сочетании с рядом допущений привело к громоздким конечным выражениям, которые затруднительно использовать на практике.

Описанный в [10] пакет алгоритмов и оригинальный программный продукт «Профиль 2500» предназначен для расчета профилировок рабочих и опорных валков стана 2500 горячей прокатки, характера и величины износа опорных валков, а также профиля и плоскостности полос конкретного сортамента и партии, с возможностью оценки и корректирования приемлемости выбранных профилировок. Однако использование этого пакета не предусматривает учет неравномерности теплового профиля и профиля износа валков, а также колебания температуры и поперечного профиля подката.

Обобщая изложенный анализ, можно укрупненно отметить следующие недостатки известных методов расчета (моделирования) профилировок валков листовых станов, снижающие их точность и в конечном итоге не позволяющие получить горячекатаные и холоднокатаные полосы с поперечной разнотолщинностью и плоскостностью, удовлетворяющими жестким требованиям современных мировых стандартов:

1. Подавляющее большинство известных, применяемых в технологии методов предусматривает определение шлифовочной выпуклости (вогнутости) валков, 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.

1.2. Анализ известных методов моделирования упругих деформаций валков листовых станов

Расчет упругих деформаций является необходимой частью расчета профилировок валков листовых станов. Кроме того, упругие деформации, переменные по длине бочки и изменяющиеся под воздействием нестабильных факторов технологии, оказывают сами по себе значительное влияние на нормируемые показатели точности поперечного профиля прокатываемых полос: поперечную разнотолщинность, клиновидность, местные утолщения и неплоскостность. Сведение к минимуму погрешностей расчета упругих деформаций валков, помимо повышения точности расчета профилировок, будет способствовать совершенствованию методов контроля указанных показателей точности листов и управления ими.

Составляющими упругой деформации валков в четырехвалковой клетки являются прогиб осей рабочих и опорных валков и упругое сжатие опорных и рабочих валков: взаимное упругое сжатие в межвалковом контакте и упругое сжатие рабочих валков в контакте с прокатываемой полосой. Известные методики расчета этих параметров (А.И. Целикова [11, 12], П.И. Грудева [13], С.С. Чепуркина [14], В.П. Полухина [11, 15], О. Эмике, К. Лукаса [16], Салганика В.М. [17] и др.) различаются числом и методом учета факторов, определяющих составляющие деформации валков, а также принятыми допущениями. По мере развития теории расчета валковых систем увеличивалось число учитываемых факторов, а характер действия нагрузок приближался к реальным условиям прокатки и контактного взаимодействия валков между собой и валков и полосы. Однако в полной мере эти условия, принятые в упомянутых работах, не учитывали реальных особенностей контакта опорных узлов валков и узлов станин рабочей клетки. В частности, в них не рассматривались условия взаимодействия подушек валков с опорными плоскостями окон станин, от которых зависят упругие деформации валков.

Характерной особенностью всех без исключения разработанных аналитических моделей упругих деформаций валков широкополосных станов [11-17] является то, что принятая в них форма кривой упругой деформации подчиняется параболическому закону по всей длине бочки каждого валка. Однако на практике в контакте рабочего валка с полосой параболическая форма имеет место только в средней части бочки, на ширине, примерно равной 90 % ширины полосы, остальные участки бочки имеют иную форму, существенно отличающуюся от параболической.

Одним из перспективных методов расчета упругих деформаций валковых систем широкополосных станов является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в системах инженерного анализа (CAE-системах) [18]. Он позволяет для полноразмерной трехмерной модели валкового узла найти перемещение любой точки, как по объему, так и по длине бочек рабочего и опорного валков, и тем самым определить положение активных образующих рабочих валков, формирующих поперечный профиль полосы.

Нами обнаружена единственная работа [19], в которой приведены результаты моделирования упругих деформаций валков методом конечных элементов с использованием CAE-системы. Контактное взаимодействие рабочего валка с полосой приближено в этой работе к реальному: сила прокатки распределена по всей площади очага деформации, однако сеточные модели валков приняты цилиндрическими, без учета реальных профилировок. Схемы фиксации шеек валков в работе [19], показанные на рис. 1.1, являются упрощенными: подшипники опорного валка заменены неподвижными кольцевыми сегментами 1 с углом охвата 90° , а подшипники рабочего валка представлены неподвижными кольцевыми сегментами 2, с целью ограничения перемещения в горизонтальном направлении, без учета того, что указанная фиксация препятствует также перемещению шеек по вертикали и повороту их поперечных сечений, имеющим место в реальной клетке «кварто».

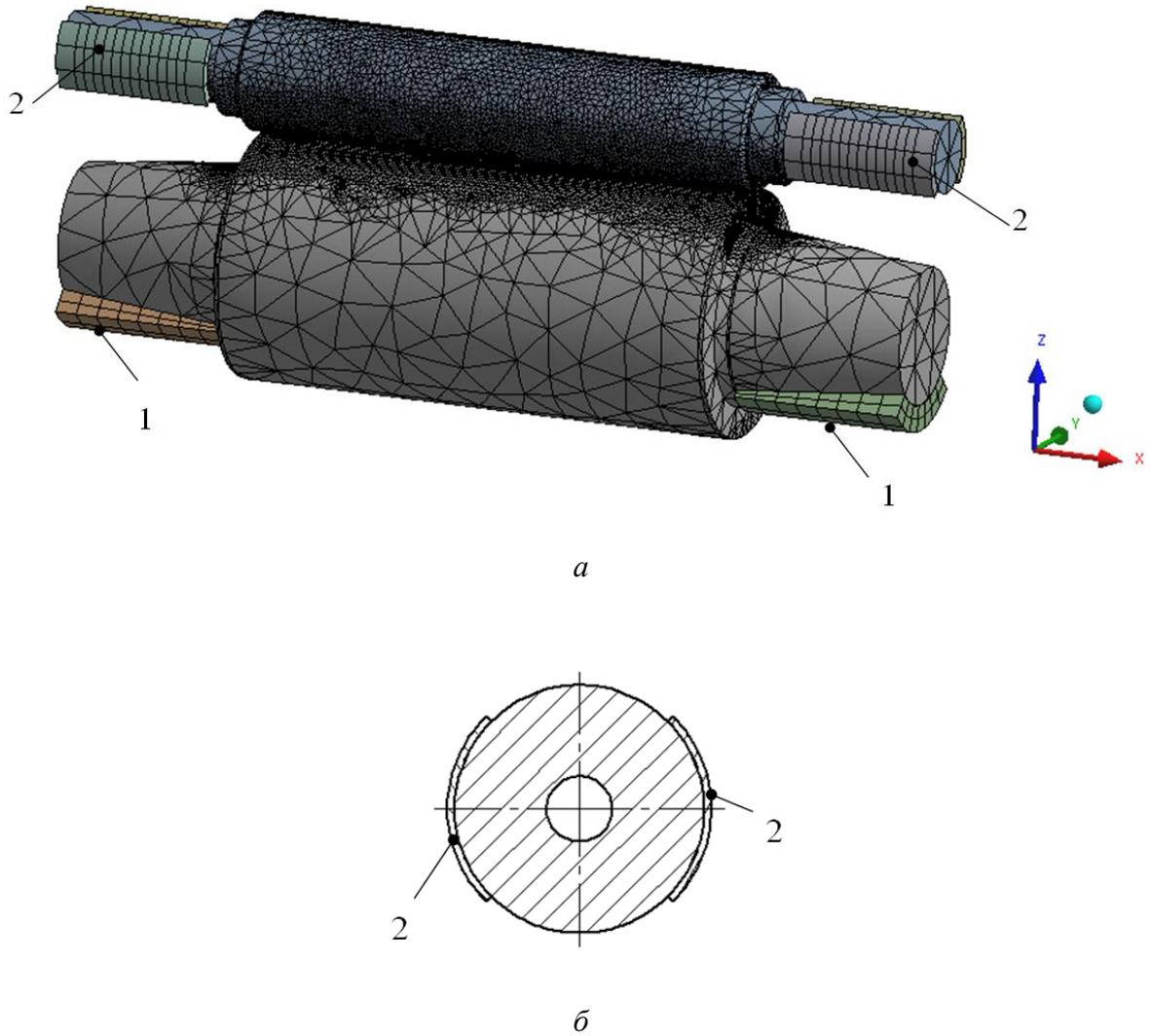


Рис. 1.1. Сеточная модель валкового узла клетки «кварто», предложенная в работе [19]:
a – общий вид; *б* – сечение шейки рабочего вала

В условии контактного взаимодействия бочек рабочего и опорного валков учитывается возможность взаимного относительного смещения контактных участков бочек рабочего и опорного валков в осевом направлении путем задания коэффициента трения скольжения, равного 0,1. Оценка влияния на точность результатов расчета принятых схем взаимодействия валков с полосой, между собой и контактными элементами рабочей клетки в публикации [19] не приводится.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что проблема моделирования упругих деформаций валков в силу своей сложности еще не

является до конца исследованной. Применение современных компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов и позволяющих описывать совместное деформирование рабочего и опорного валков в объемной (3D) постановке, и учет реальных особенностей работы их опорных узлов позволят дополнить имеющиеся знания и получить новые научные результаты.

1.3. Анализ форм кривых теплового профиля и упругих деформаций рабочего валка

Особый интерес при моделировании профилировок представляет форма кривой теплового профиля рабочего валка. Ее отличие от плавной параболы вызывает неравномерную деформацию и вытяжку по ширине прокатываемых полос.

В общем случае под тепловым профилем понимают тепловую выпуклость или вогнутость валка, т.е. разницу в диаметрах в середине и у края бочки валка, обусловленную различными значениями температуры. Разница температур между серединой и краем бочки для рабочих валков полосовых и листовых станов горячей и холодной прокатки достигает 20-50 °С, для опорных – 5-15 °С [16, 20].

В работе [2] дана схема распределения относительных среднеинтегральных температур по длине бочки валка (рис. 1.2). Кривая 1 описывает изменение температур поверхностного слоя бочки (среднеинтегральных за оборот), кривая 2 – средних слоев для каждого поперечного (радиального) сечения бочки, т.е. среднеинтегральных не только за оборот (при изменении угла поворота φ от 0 до 2π), но и по радиусу (при изменении радиуса от 0 до $R = D/2$), кривая 3 – парабола. Этот график представлен авторами работы [2] в относительных температурах

$$\theta(z) = \frac{T(z) - T_{\text{ж}}}{T_0 - T_{\text{ж}}} 100, \quad (1.15)$$

где z – расстояние от середины бочки по оси валка, мм; $T(z)$ – абсолютная температура в сечении с осевой координатой z ; T_0 – абсолютная температура в середине бочки, К, $T_{\text{ж}}$ – абсолютная температура охлаждающей жидкости, К.

Радиальные тепловые деформации, образующие тепловой профиль валков, пропорциональны средненитегральным температурам по сечению, и кривую 2 можно рассматривать как кривую теплового профиля валка.

Из рис. 1.2 видно, что тепловые деформации распределяются вдоль бочки не по параболическому закону (кривая 3). Тепловые деформации в средней части бочки (примерно на участке $2/3$ ширины прокатываемой полосы) практически одинаковы, а вблизи участков, соответствующих боковым кромкам, происходит резкое уменьшение в направлении к торцам бочек. Вблизи торцов бочки тепловые деформации незначительны: абсолютная температура здесь на 2-6

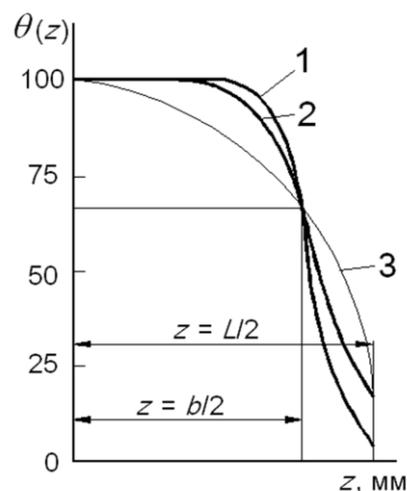


Рис. 1.2. Изменение относительных средненитегральных температур от середины к краю бочки валка

°С превышает температуру охлаждающей жидкости и мало изменяется в течение всего цикла прокатки. Такая форма кривой была подтверждена в работах [3, 21]. Это отличие кривой теплового профиля от параболы вызывает неравномерную деформацию по ширине полосы.

Построение формы активной образующей рабочего валка предложено в работе [1] осуществлять методом суперпозиции кривых теплового профиля и упругой деформации. Упрощенная схема образования формы активной образующей рабочего валка при прокатке (рис. 1.3), приведенная в работе [1], выполнена при условии цилиндрического его исходного профиля и равномерного охлаждения поверхности бочки по ширине полосы.

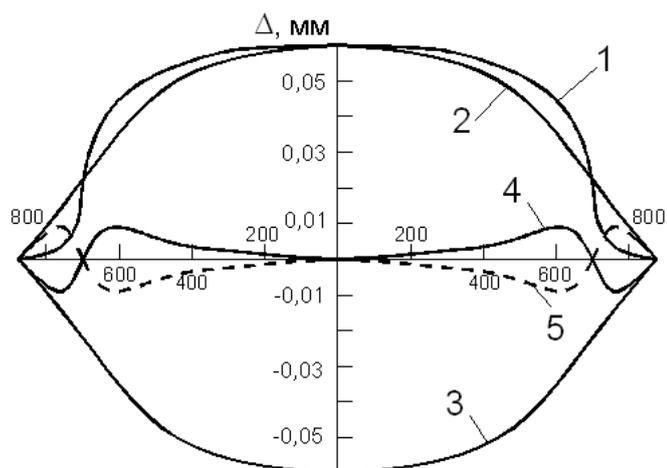


Рис. 1.3. Упрощенная схема образования профиля активной образующей верхнего рабочего вала при прокатке (без учета сплющивания):

- 1 – тепловая выпуклость вала; 2 – парабола, соединяющая середину и края бочки; 3 – упругая деформация вала; 4 – суперпозиция кривых 1 и 3; 5 – зеркальное отображение кривой 4

Кривая теплового профиля *1* отличается от параболы *2*, соединяющей середину и края бочки. Форма кривой *3* упругой деформации вала принята в работе [1] параболической, что является существенным недостатком данной методики. Окончательный профиль – активная образующая нижнего вала *4* – представляет собой суперпозицию (геометрическую сумму) кривых теплового профиля *1* и упругой деформации *3*. Кривая *5* – зеркальное отображение кривой *4* (т.е. суперпозиция кривых *1* и *3* для верхнего вала).

Как видно из рис. 1.3, если считать кривую упругой деформации параболической, кривая *4* имеет две характерные выпуклости на расстояниях 50-100 мм от кромок полосы. На участках, соответствующих выпуклостям, валок испытывает максимальные давления и подвергается повышенному изнашиванию. Следовательно, плавная форма шлифовочной профилировки бочки рабочего вала не обеспечивает плавной формы активной образующей. Для стабилизации условий деформации по ширине полосы авторы работы [1]

предложили шлифовать валки, которые имели ранее цилиндрический исходный профиль, по кривой 5 рис. 1.3.

Несмотря на перспективность метода суперпозиции кривых упругих деформаций и теплового профиля, примененного в работе [1], принятая параболическая форма кривой упругой деформации искажает конечный результат – форму кривой активной образующей. Значит и предложенная в работе [1] профилировка вряд ли обеспечит равномерность контактных напряжений по ширине полосы.

Изложенное дает основание сделать вывод, что с использованием существующих методов разработать оптимальную профилировку валков затруднительно. Наиболее перспективным подходом к решению данной задачи является построение профиля бочки в виде непрерывной кривой с применением одного из методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния упругих тел – метода конечных элементов (МКЭ). До настоящего времени такой подход не применяли.

1.4. Анализ шлифовочных профилировок валков, применяемых на практике в листопрокатных цехах

На практике применяют разные шлифовочные профилировки валков в зависимости от типа стана и условий его работы [8, 16, 22-24]. Множество используемых профилировок обусловлено также тем, что невозможно подобрать такой шлифовочный профиль, который в одинаковой степени удовлетворял бы каждому типоразмеру и каждой марке стали, прокатываемых за кампанию рабочих валков.

На широкополосных станах горячей прокатки для рабочих валков непрерывной группы клетей применяют несколько основных типов профилировок (опорный валок может иметь скосы разной величины):

- оба валка цилиндрические;
- оба валка вогнутые (парабола);

- оба валка выпуклые (парабола);
- один валок цилиндрический, второй – вогнутый;
- один валок цилиндрический, второй – выпуклый.

На толстолистовых станах применяют самые разнообразные профилировки как рабочих, так и опорных валков – от вогнутых до выпуклых. Опорные валки могут иметь одинарные или двойные скосы.

На широкополосных станах холодной прокатки профилировки опорных валков выпуклые или цилиндрические и отличаются фактически только длиной и величиной скосов на краях бочки, рабочие валки профилируют выпуклыми, вогнутыми (по параболической кривой) или цилиндрическими.

На станах, имеющих систему осевой сдвижки рабочих валков, широко применяется *S*-образная профилировка (CVC) [20, 25-27]. Изменение диаметра валка в системе CVC по длине бочки составляет 0,3 - 0,5 мм. Методика расчета основных конструктивных параметров *S*-образной профилировки приведена в работах [5, 6, 28].

Еще одним из перспективных направлений улучшения качества полос является прокатка в скрещающихся рабочих валках, методика профилирования скрещающихся рабочих валков разработана в [29]. Однако механизмы скрещивания валков усложняют конструкцию и эксплуатацию рабочей клетки, поэтому этот метод не нашел широкого применения на действующих станах.

В работах [3, 30] с целью улучшения поперечного профиля горячекатаных полос и уменьшения неравномерности износа предложено шлифовочную профилировку выполнять с вогнутостями (дополнительными выемками) образующей в местах максимальных контактных напряжений.

На основе анализа профилограмм рабочих валков стана горячей прокатки 2000 в работах [31-33] представлена разработанная и испытанная новая форма их шлифовочной профилировки с учетом диапазонов профилеразмеров сортамента стана, позволившая в значительной степени

компенсировать несоответствие форм кривых теплового профиля и упругих деформаций.

В [34] предложена концепция профилирования валков чистовой группы стана горячей прокатки, сущность которой заключается в том, что образующим рабочим валков придают вогнутость, уменьшающуюся по ходу прокатки от 0,34-0,36 в первой до 0,1-0,2 мм в последней клетки чистовой группы.

Не все рассмотренные профилировки валков определяются с учетом несоответствия кривых упругой деформации и теплового профиля, что приводит к неравномерности износа валков и ухудшению поперечного профиля и планшетности горячекатаных и холоднокатаных полос.

Учитывая изложенное, развитие и совершенствование существующих методов расчета шлифовочных профилировок, с учетом новых знаний о форме кривой упругой деформации, которые могут быть получены с применением метода конечных элементов, представляется весьма актуальной научно-технической задачей.

1.5. Проблема развития методологии расчета валковых систем рабочих клеток широкополосных станов

Начиная с 80-х годов XX века, конструкция рабочих клеток тонколистовых станов ведущих металлургических предприятий ряда стран претерпела существенные изменения: они были оснащены новыми средствами воздействия на профиль и форму проката (системами осевой сдвижки, механизмами горизонтальной стабилизации рабочих валков); начали применять шестивалковые клетки, в которых между опорным и рабочим валками установлен промежуточный валок; изменилось соотношение между конструктивными параметрами рабочих и опорных валков путем уменьшения диаметра рабочих валков до 200-300 мм,

позволившего сократить габариты рабочих клеток, уменьшив капитальные и энергетические затраты.

Указанные изменения лишь частично затронули отечественные широкополосные станы. Metallургические предприятия России используют в основной массе широкополосные станы с традиционными клетями «кварто». К ним относятся клетки, разработанные в 60-70-х годах XX века с опорными валками большого диаметра, с приводными рабочими валками меньшего диаметра и массивными станинами закрытого типа, отличающимися большой жесткостью. Размеры валков по данным [5, 35-42] на станах холодной прокатки составляют $D_p = 400-600$ мм; $D_{оп} = 1300-1600$ мм; $L_p = 1200-2500$ мм и на станах горячей прокатки в чистовой группе: $D_p = 650-800$ мм; $D_{оп} = 1250-1600$ мм; $L_p = 1700-2500$ мм.

Для обеспечения пригодности разрабатываемых методов расчета валковых систем рабочих клеток необходимо учитывать ряд их конструктивных особенностей. В работе [5] приведен анализ трех особенностей.

Первая особенность – малая жесткость валкового узла в горизонтальной плоскости, поскольку в этой плоскости бочка рабочего валка не имеет опоры. В результате даже небольшие зазоры между подшипниками, подушками и окнами станин, вызванные допусками подвижных посадок и износом, приводят к горизонтальным смещениям вертикальной осевой плоскости рабочих валков относительно опорных, т.е. рабочие валки оказываются в неустойчивом положении, а их оси могут перекашиваться. Это приводит к негативным последствиям: в валковом узле возникают повышенные вибрации, осевые усилия, а размер межвалкового зазора подвергается непрогнозируемым колебаниям, что снижает точность прокатки.

Для устранения этих негативных явлений в валковом узле уже на стадии конструирования предусматривается горизонтальное смещение вертикальных осевых плоскостей опорных и рабочих валков относительно друг друга.

Вторая особенность заключается в том, что работа пары «рабочий валок – опорный валок» происходит по принципу фрикционной передачи, в которой одно звено – ведущее, приводное, а второе – ведомое, холостое, причем передача вращения от приводного валка к холостому осуществляется силами межвалкового трения 1 рода – трения покоя. Если силы сопротивления вращению холостого валка превысят силы трения покоя, начинается пробуксовка (трение покоя переходит в трение скольжения) что для прокатного стана является аварийной ситуацией. Поэтому этот фактор необходимо учитывать при расчете главного привода и при разработке параметров технологического процесса.

Третья особенность относится к параметру валков – твердости бочки. Рабочие и опорные валки этих клетей принадлежат к разным группам твердости. Рабочие валки станов холодной прокатки имеют бочку с особо твердым поверхностным слоем (твердость по шкале Шора HSh (D) = 90-105 ед), характеризуемым минимальным износом и незначительными упругими деформациями, без чего невозможна точная прокатка тонких и тончайших полос. С другой стороны, особо твердые валки обладают пониженной вязкостью, уменьшающей их сопротивление упругими деформациями изгиба, однако собственный изгиб рабочих валков минимален благодаря упругому контакту с жесткими опорными валками. Опорные валки имеют бочку с твердым поверхностным слоем (60-80 HSh (D)) и более мягкой и вязкой сердцевиной, что обеспечивает им повышенное сопротивление упругому изгибу, хотя и меньшую износостойкость.

Рабочие валки клетей станов горячей прокатки выполняют, как правило, чугунами с поверхностным слоем 70-90 HSh (D), а опорные из стали с поверхностным слоем 50-70 HSh (D) [35, 40].

Соотношение твердостей бочек опорного и рабочего валков в диапазоне 0,6-0,8 следует считать наиболее приемлемым для их эксплуатации в клетях «кварто», т.к. оно уменьшает вероятность появления поверхностных дефектов контактно-усталостного характера.

Методология конструирования рабочих клетей, изложенная в работе [5], не учитывает такую особенность, как протяженность контакта бочек рабочего и опорного валков.

В работах [37, 43] показано, что если протяженность контакта бочек рабочего валка с опорным совпадает с протяженностью контакта бочки рабочего валка с полосой, то прогиб рабочих валков совпадает с прогибом опорных, если же такого совпадения нет, то в клетях «кварто» возникает изгибающий момент, действующий на рабочие валки от воздействия краевых участков опорных валков, находящихся за пределами ширины полосы. Условия совпадения протяженности контакта рабочих валков с опорными с протяженностью контакта рабочих валков с полосой пытались обеспечить применением скосов длиной 100-200 мм по краям опорных валков. На некоторых станах для предотвращения контакта торцевых участков бочек рабочих валков при прокатке полос минимальной ширины, помимо концевых скосов, бочка опорного валка была изготовлена на 100 мм короче бочки рабочего. При изменении ширины прокатываемой полосы протяженность скосов следует менять, а это можно осуществить только перевалкой опорных валков, что снижает производительность стана. В какой-то мере задачу решают за счет применения опорных валков с двойными скосами: длина наружного скоса 50-200 мм с большим углом конусности и внутреннего скоса 200-350 мм – с меньшим углом конусности [1].

В традиционной клетях «кварто» с увеличением объема производства наиболее широких полос паспортного сортамента и даже не предусмотренных паспортной характеристикой станов, с высокими требованиями к плоскостности и качеству поверхности полос наличие скосов на бочках опорных валков приводит к появлению дефектов на прикромочных участках полос, например ненормативной шероховатости. Причиной данного дефекта является пониженное давление на рабочий валок со стороны опорного на участке, где выполнены скосы [44, 45].

Один из действенных путей решения этого вопроса на станах холодной прокатки – отказ от скосов опорных валков путем изменения их шлифовочной профилировки – увеличения выпуклости – и пересчет профилировки рабочих валков для всего диапазона ширин и толщин сортамента стана, чтобы сохранить их плоскостность.

В работе [20] приведены результаты исследований влияния профилировки опорных валков со скосами на плоскостность полос при использовании гидроизгиба рабочих валков. Вопрос о влиянии скосов на шероховатость и её распределение по ширине прокатываемых полос ранее не рассматривался.

В шестивалковой клети применение осевой сдвижки промежуточных валков эквивалентно изменению скосов на опорных валках [37]. При изменении ширины прокатываемой полосы промежуточные валки устанавливаются всегда так, чтобы их торцы соответствовали новой ширине полосы. Таким образом, поперечный профиль полосы стабилизируется на всех ширинах.

Вопрос о целесообразности использования шестивалковых клетей не имеет однозначной точки зрения у проектантов металлургических агрегатов и технологов прокатных цехов, поскольку шестивалковая клеть, по сравнению с четырехвалковой («кварто»), имеющей те же диаметры рабочих и опорных валков, требует бóльших капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Кроме того, установка между рабочим валком, имеющим диаметр бочки D_p , и опорным валком с диаметром бочки $D_{оп}$, промежуточного валка с диаметром бочки $D_{пр}$ ($D_p < D_{пр} < D_{оп}$), увеличивает габариты и уменьшает жесткость рабочей клети из-за дополнительных упругих деформаций промежуточного валка и удлиненных стоек узла станин.

В технической литературе вопросы проектирования шестивалковых клетей не нашли должного освещения, так как разработчики и изготовители не публикуют методик и результатов расчета, а приводят лишь параметры

введенных в эксплуатацию клетей. С этих позиций представляет актуальность проблема их расчета и оптимизации основных параметров.

На основе обзора литературных публикаций [5, 6, 37, 46-54] о широкополосных станах холодной прокатки с шестивалковыми клетями, оснащенными осевой сдвижкой и горизонтальной стабилизацией рабочих валков, можно сделать некоторые обобщения о параметрах этих клетей, введенных в действие с 80-х годов XX века до настоящего времени, которые приведены в таблице 1.1.

Из этих данных видно, что диапазоны основных параметров клетей данного типа весьма широкие: соотношения максимального и минимального диаметров рабочих валков составляет 2,6, промежуточных – 1,44, опорных – более 1,5. От указанных соотношений зависят металлоемкость, капитальные затраты и расход энергии при прокатке. С использованием модели энергосиловых параметров шестивалковых клетей в работах [55-58] установлено, что один из наиболее экономичных и технологичных вариантов конструкции клетей данного типа – клеть с рабочими валками диаметром 200 мм и с главным приводом через промежуточные валки.

Таблица 1.1

Параметры шестивалковых клетей

№	Параметр	Значение
1	Диаметр рабочих валков D_p , мм	180 – 470
2	Диаметр промежуточных валков $D_{пр}$, мм	450 – 650
3	Диаметр опорных валков $D_{оп}$, мм	1000 – 1525
4	Длина бочки рабочего валка, L мм	1400 – 2500
5	Ширина полос, мм	500 – 2050
6	Максимальная скорость прокатки, м/с	до 30

Практический интерес имеет анализ показателей точности продукции шестивалковых клетей. Для этого необходимо иметь достоверную методику расчета их упругих деформаций как в продольном, так и в поперечном направлениях. Такая методика ни в отечественной, ни в зарубежной литературе ранее не публиковалась.

В работах [46, 47] приведены результаты сравнения жесткости четырех- и шестивалковых клетей станов холодной прокатки, выполненные специалистами компании Siemens VAI, однако в этих работах не содержится информации об использованных моделях, с помощью которых выполнялись расчеты упругих деформаций. Кроме того, авторы [46, 47] сравнивали четырех- и шестивалковые клетки с рабочими валками, имеющими диаметры бочек 420-470 мм. Использовать шестивалковую клетку с такими диаметрами рабочих валков нецелесообразно: они, по сравнению с клетями, имеющими диаметр рабочих валков 180-200 мм, лишены существенных преимуществ – возможности уменьшить усилие прокатки и производить полосы минимальных толщин, кроме того, они имеют повышенную металлоемкость.

С этих позиций представляется актуальной задача разработки методики определения упругих деформаций и жесткости шестивалковой клетки и ее применения для сопоставительного анализа жесткости шестивалковой и четырехвалковой клетей и их эффективности при регулировании показателей точности прокатываемых полос.

Выводы по главе 1

1. Анализ тенденций развития технологии и оборудования листопрокатного производства показал, что одна из этих тенденций – ужесточение требований к точности размеров и формы (плоскостности) прокатываемых листов – требует совершенствования методов моделирования упругих деформаций и профилировок валков листовых станов горячей и холодной прокатки.

2. Аналитический обзор известных методов моделирования упругих деформаций и профилировок валков листовых станов показал, что отсутствует однозначное понимание термина «профилировка валков». Некоторые литературные источники относят этот термин к рабочим валкам, понимая под ним не только профиль бочки, но и процесс его формирования. В ряде публикаций вводятся понятия: «начальная профилировка холодных валков», «форма профиля валков во время прокатки», но не всегда полностью раскрывается взаимосвязь между ними. Учитывая это, в данной работе для упорядочения указанных понятий принята следующая терминология:

а) *шлифовочная профилировка рабочего (опорного) валка* – изменение диаметра его бочки вдоль оси валка, обеспечиваемое шлифовкой, перед установкой в рабочую клетку в холодном состоянии:

$$\Delta D_{\text{шл}}(x) = D_{\text{шл}}(x) - D_{\text{шл}}(0), \quad (1.16)$$

где x – координата вдоль оси ($x = 0 \dots L$, где L – длина бочки); $D_{\text{шл}}(x)$ – текущее значение диаметра в сечениях с координатами « x »; $D_{\text{шл}}(0)$ – значение диаметра у края бочки ($x = 0$);

б) *активная образующая бочки валка* – кривая наружного профиля бочки вдоль оси в процессе прокатки: для рабочего валка – в контакте с полосой, для опорного валка – в контакте с рабочим:

$$\Delta R_{\text{акт}}(x) = R_{\text{акт}}(x) - R_{\text{акт}}(0), \quad (1.17)$$

где $R_{\text{акт}}(x)$ – радиус бочки в поперечном сечении с координатой « x » со стороны контакта: рабочего валка с полосой, опорного валка – с бочкой рабочего; $R_{\text{акт}}(0)$ – значение радиуса у края бочки;

в) *тепловой профиль бочки рабочего (опорного) валка* – распределение вдоль оси приращений диаметров бочки от холодного состояния, вызванных неравномерным нагревом и охлаждением в процессе прокатки:

$$\Delta D_{\text{т}}(x) = D_{\text{т}}(x) - D_{\text{шл}}(x), \quad (1.18)$$

$$(x = 0 \dots L)$$

где $D_T(x)$ – значение диаметра бочки во время прокатки в поперечном сечении, в котором в холодном состоянии (до начала прокатки) диаметр был равен $D_{шл}(x)$ (см. выражение (1.16));

г) *упругие деформации бочки валка* – распределение по длине бочки суммы прогибов оси и сплющиваний поверхностного слоя, вызванных контактными напряжениями во время прокатки, неравномерными по ширине полосы и по длине бочки;

д) *профиль износа бочки рабочего (опорного) валка* – изменения вдоль оси уменьшений первоначального (шлифовочного) диаметра бочки после установки валка в рабочую клетку, вызванные износом, неравномерным по длине бочки и увеличивающимся в функции времени;

е) *профилирование валков (шлифовочное и тепловое)* – выполнение на вальцешлифовальном станке заданной шлифовочной профилировки и воздействие на тепловой профиль секционной подачей охладителя (воды или эмульсии), дифференцированное по длине бочки;

ж) *процесс формирования активных образующих валков* – совмещение во время прокатки шлифовочных профилировок, упругих деформаций, тепловых профилей и профилей износа рабочих и опорных валков путем их геометрического суммирования (суперпозиции) с поперечным профилем прокатываемой полосы под действием контактных напряжений, возникающих в очаге деформации, переменных по ширине полосы.

3. Аналитический обзор позволил также установить, что используемые на практике методы моделирования профилировок и упругих деформаций валков не обеспечивают получения листов с повышенной точностью размеров и формы из-за следующих недостатков:

3.1. В подавляющем большинстве известных методов предусмотрено определение шлифовочной выпуклости или вогнутости на длине бочки валков как разности диаметров в ее середине и на краевых участках и не имеется возможности рассчитать шлифовочную профилировку в виде непрерывной кривой по длине бочки.

3.2. Во всех известных методах расчета профилировок валков используются аналитические выражения, основанные на различных допущениях, при этом чаще всего отсутствуют достоверные сведения о погрешностях, вносимых в расчет принятыми допущениями.

3.3 В известных аналитических методах расчета упругих деформаций валков принято, что форма кривой упругой деформации рабочего валка на всей длине бочки подчиняется параболическому закону, что противоречит практическому опыту.

4. Анализ возможных путей устранения указанных недостатков показал, что наиболее перспективным методом моделирования профилировок и упругих деформаций валков с минимальной погрешностью является метод конечных элементов.

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

2. Разработка новых методов моделирования шлифовочных профилировок и упругих деформаций валков листовых станов

2.1. Основные принципы создания новой конечно-элементной модели узла валков клетки «кварто» [59-67]

Чтобы построить шлифовочный профиль бочки валка в виде непрерывной кривой, был применен один из методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния упругих тел – метод конечных элементов [68-72], реализованный в САЕ-системе. Ранее для разработки профилировок валков его никто не использовал. Выбор нами этого метода был обоснован тем, что он позволяет для полноразмерной трехмерной модели валкового узла найти перемещение любой точки, как по объему, так и по длине бочек рабочего и опорного валков при прокатке, и тем самым определить напряжения, действующие по длине контакта рабочего и опорного валков, положения активных образующих рабочих валков – кривых, формирующих поперечный профиль полосы.

На первом этапе конечно-элементная модель валкового узла была разработана в виде, показанном на рис. 2.1. Бочки сеточных моделей опорного и рабочего валков выполнены с 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:

$$\begin{aligned} \Delta D_{\text{шл.оп}} &= D_{\text{оп.с}} - D_{\text{оп.к}}; \\ \Delta D_{\text{шл.р}} &= D_{\text{р.с}} - D_{\text{р.к}}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

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).

В контакте сеточной модели рабочего валка с полосой принята упрощенная схема нагружения: погонное давление со стороны полосы,

распределенное по линии $q = P/b_{\text{п}}$, где P – сила прокатки, $b_{\text{п}}$ – ширина полосы, без учета реальной площади контакта, зависящей от длины очага деформации. Со стороны нажимных устройств к шейкам моделей опорных валков приложены силы $P/2$, распределенные равномерно по длине шеек, без учета реальной площади контактного взаимодействия между шейками и подшипниками под нагрузкой.

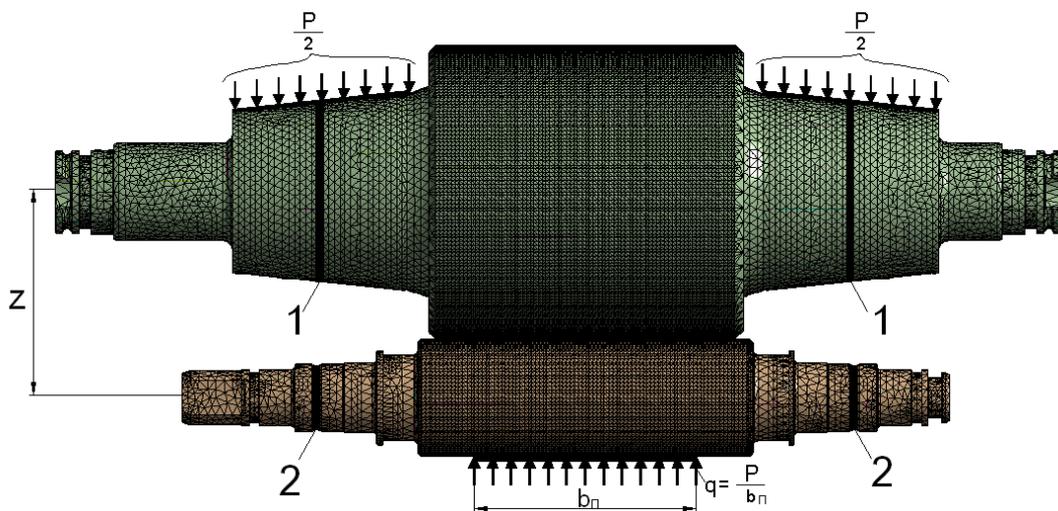


Рис. 2.1. Сеточная модель валкового узла клетки «кварто

Схемы закрепления подшипниковых узлов заданы упрощенно. В модели опорного валка сечения 1 зафиксированы по типу жесткой заделки, в то время как в реальной клетке фиксируются наружные горизонтальные поверхности подушек (полностью или частично). В модели рабочего валка зафиксировано вертикальное положение сечений 2, с возможностью перемещения их по вертикали, без учета той особенности, что в реальной клетке шейки рабочих валков не только смещаются по вертикали, но и могут поворачиваться под влиянием прогиба их осей. В контакте бочек рабочего и опорного валков не учитывается возможность смещения контактных участков бочки рабочего валка относительно бочки опорного в осевом направлении.

Дальнейший анализ показал, что точность расчета упругих деформаций и напряжений, действующих в валках, а также поперечного профиля полосы с использованием САЕ-системы 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. 2.2 и 2.3). Расчетные схемы созданы для верхней и нижней пары валков по их реальным чертежам.

Поскольку с опорными поверхностями узла станин контактируют не сами валки, а их подушки, в модель впервые включены подушки рабочего и опорного валков, контактирующие с опорными поверхностями узла станин. При этом учтено, что упругие деформации подушек с подшипниками относительно шеек валков пренебрежимо малы по сравнению с деформациями бочек в контакте с полосой. Подшипниковые опоры моделируются жесткими телами.

Бочки твердотельных моделей опорного и рабочего валков выполнены, как и в первом варианте модели, с исходными (принятыми по технологии) шлифовочными профилировками.

Исходное межосевое расстояние между виртуальными рабочим и опорным валками z задано из условия, чтобы до приложения рабочей нагрузки (силы прокатки) валки соприкасались точками профилей бочек, принадлежащими сечениям с максимальными диаметрами (рис. 2.4):

– при выпуклых профилировках:

$$z = 0,5(D_{\text{оп.с}} + D_{\text{р.с}}), \quad (2.2)$$

– при вогнутых профилировках:

$$z = 0,5(D_{\text{оп.к}} + D_{\text{р.к}}). \quad (2.3)$$

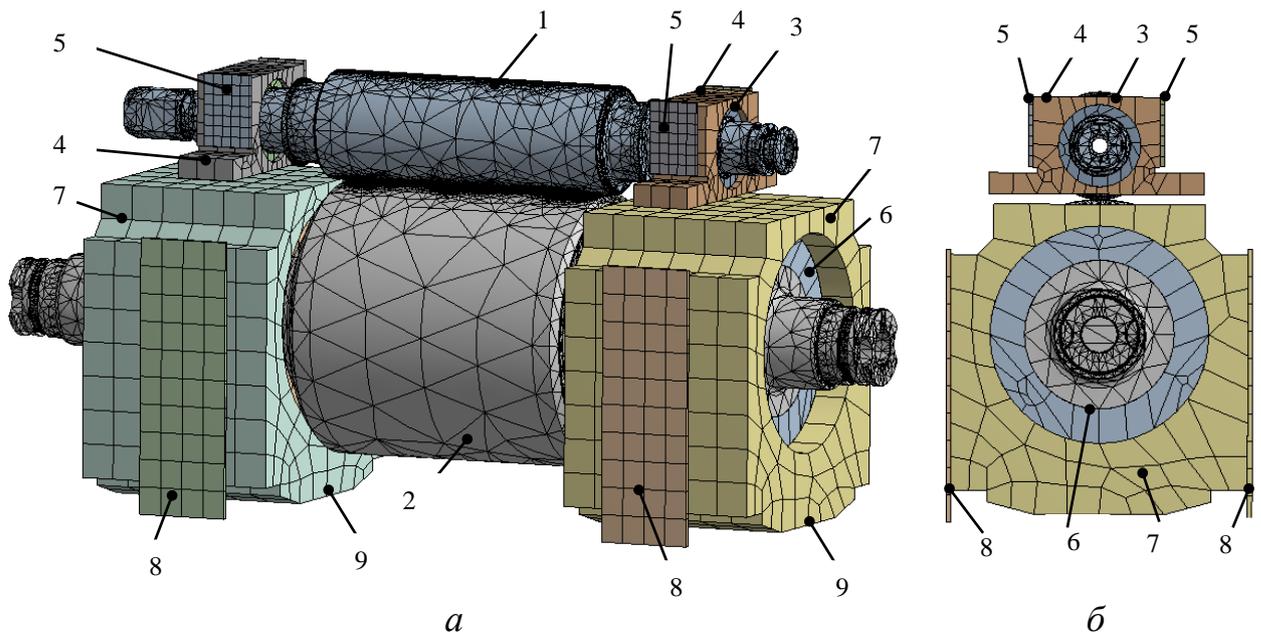


Рис. 2.2. Усовершенствованная конечно-элементная модель нижней пары валков клетки «кварто»: *а* – общий вид; *б* – вид с неприводной стороны: 1 – рабочий валок; 2 – опорный валок; 3 – подшипники рабочего валка; 4 – подушки рабочего валка; 5 – планки, закрепляемые на опорных плоскостях корпусов, установленных в окна 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

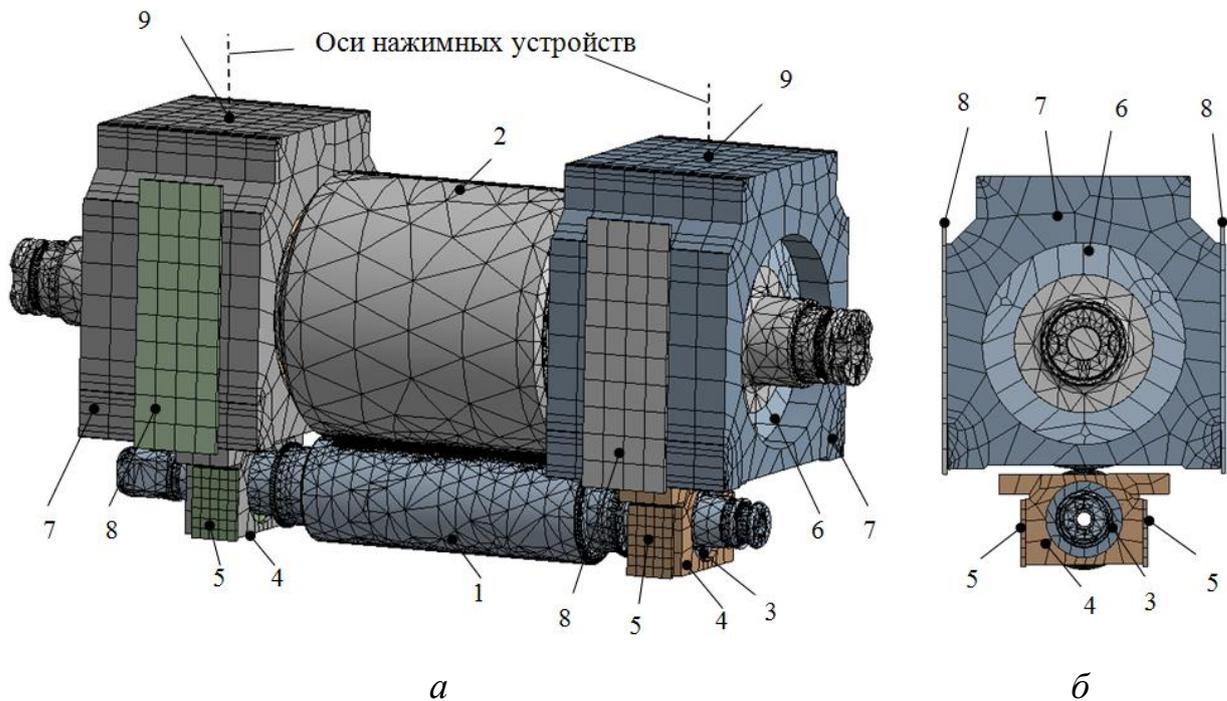


Рис. 2.3. Усовершенствованная конечно-элементная модель верхней пары валков клетки «кварто»: *а* – общий вид; *б* – вид с неприводной стороны (обозначения те же, что и на рис. 2.2)

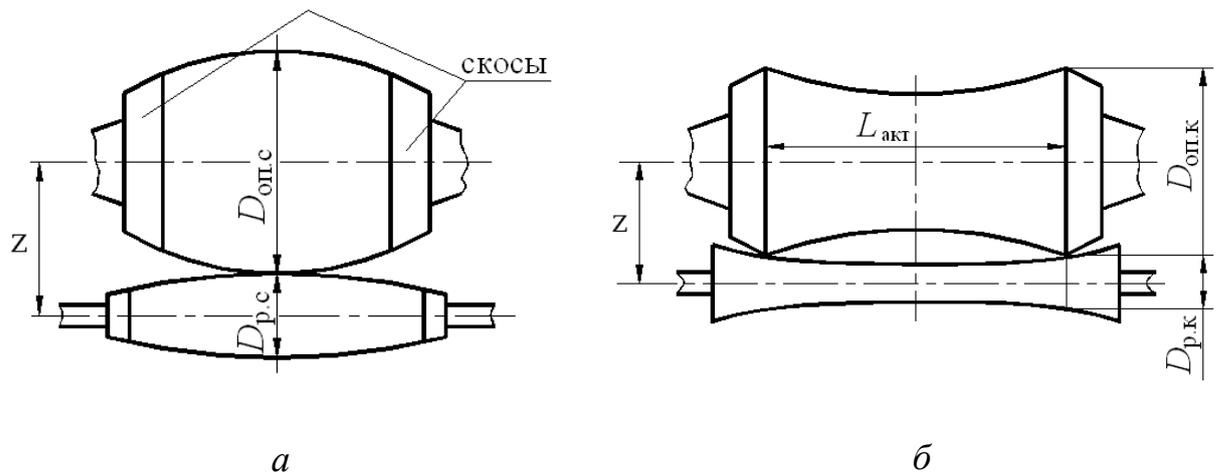


Рис. 2.4. Межосевое расстояние в ненагруженном состоянии:
a – при выпуклых профилировках;
б – при вогнутых профилировках

В модели нижней пары валков (рис. 2.2) нижние грани подушек опорного валка 9 жестко закреплены, так как в реальной клетке они опираются на плоские поверхности клиновых нажимных устройств, установленных на нижних поперечинах станин. Также жестко закреплены грани планок 5 и 8, неподвижно соединенные с вертикальными плоскостями окон станин. Такая схема закреплений, как и в реальной клетке «кварто», 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.

Верхние грани подушек модели верхнего опорного валка (рис. 2.3) были зафиксированы в точке контакта, находящейся на оси гидравлического или винтового нажимного устройства.

К модели рабочего валка со стороны полосы приложили силу, распределенную по площади очага деформации, ширина которого

определяется шириной прокатываемой полосы. Длину очага деформации и распределение по ней контактных напряжений рассчитали заранее по наиболее точной из известных методик [5] (рис. 2.5), которая была нами проверена с использованием метода конечных элементов [73]. На поверхности контакта модели рабочего валка с прокатываемым металлом был настроен размер конечных элементов и создана упорядоченная сетка.

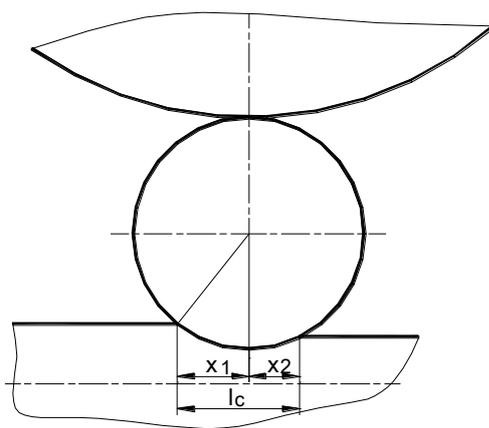


Рис. 2.5. Схема к заданию длины очага деформации:
 x_1 — длина зоны упругого и пластического обжатия полосы,
 x_2 — длина зоны упругого восстановления части толщины полосы

При импорте модели из CAD-системы были автоматически сгенерированы 17 контактных пар между сопрягаемыми поверхностями деталей валкового узла. В контакте рабочего и опорного валков было выполнено измельчение и структурирование сетки и задан коэффициент трения покоя, равный 0,1. В контактах планок 5, 8 и подушек валков был задан коэффициент трения скольжения.

В результате приложения указанных нагрузок в каждой точке рабочего и опорного валков конечно-элементной 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 (на первом этапе без учета теплового профиля и износа валков).

2.2. Первые результаты моделирования упругих деформаций валков

Исследование по модели упругих деформаций валков и определение поперечного профиля полосы было выполнено на реальном сортаменте и режимах прокатки действующего пятиклетевого 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. В табл. 2.1 приведен реальный режим прокатки на пятиклетевом стане 1700 полосы автомобильного сортамента: сталь 08Ю, ширина 1300 мм и толщина 0,76 мм. 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 (профилировки выполнены выпуклыми параболическими кривыми).

Таблица 2.1

Режим прокатки полосы 0,759x1300 мм

Номер клетки i	Марка стали	Ширина, мм	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	N_{i-1} , кН	N_i , кН	P_i , МН
1	08Ю	1300	3,95	3,083	2,161	168	400	13,02
2			5,96	2,161	1,537	400	312	9,96
3			8,39	1,537	1,091	312	248	9,37
4			11,53	1,091	0,792	248	188	8,56
5			12,03	0,792	0,759	188	32,8	11,19

v_i – скорости прокатки; h_{i-1} , h_i – толщина полосы перед и за клетью; N_{i-1} , N_i – силы натяжений; P_i – силы прокатки

На рис. 2.6 представлено распределение упругих деформаций в вертикальной осевой плоскости узла нижних рабочего и опорного валков в сборе с подушками, полученное с использованием САЕ-системы. Величины деформаций (отклонений от исходного, ненагруженного состояния) эта система показывает с помощью различных цветовых оттенков (слева на рис. 2.6 приведена шкала, переводящая цвета в числовые значения деформаций в миллиметрах).

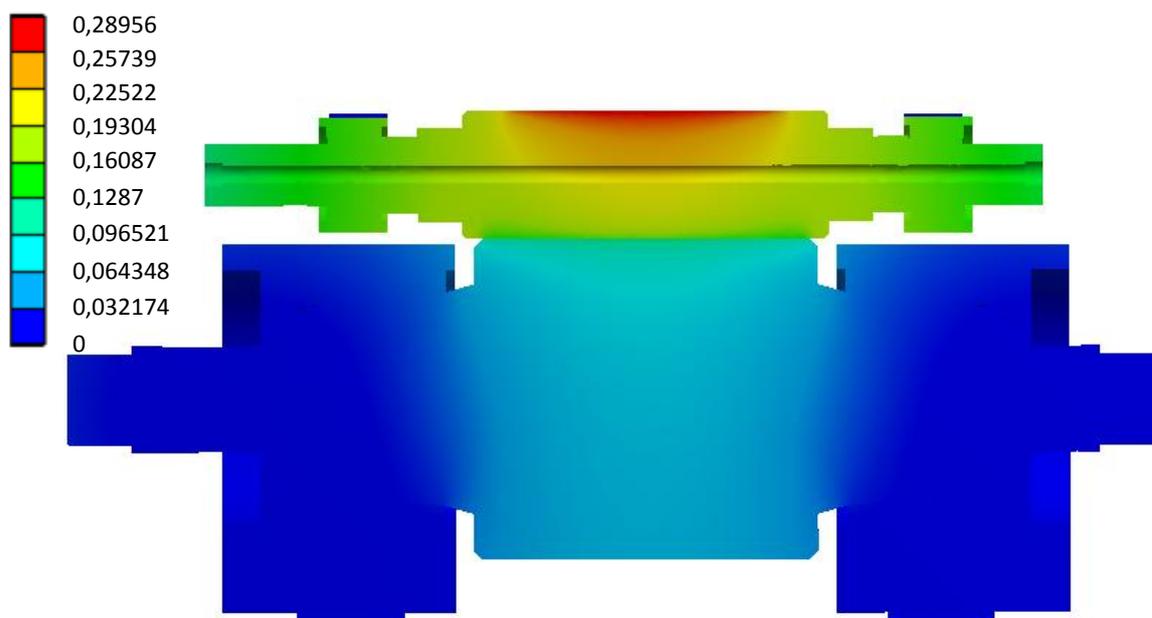


Рис. 2.6. Распределение в вертикальной осевой плоскости рабочих и опорных валков упругих деформаций, полученное с помощью трехмерной модели валкового узла клетки «кварто» 1700 ($D_p = 600$ мм; $D_{оп} = 1500$ мм и $\Delta D_{ш.р} = 0,1$ мм; $\Delta D_{ш.оп} = 0,4$ мм, опорный валок без скосов ширина полосы $b_{п} = 1300$ мм, толщина полосы 0,76 мм и усилие прокатки $P = 11,2$ МН)

На рис. 2.7 показана кривая упругих деформаций (активная образующая) нижнего рабочего валка (без учета теплового профиля и износа), полученная в САЕ-системе после перевода цветовых значений в числовые.

Рис. 2.6 и 2.7 относятся к пятой клетки пятиклетевого стана 1700 при прокатке по режиму, указанному в табл. 2.1.

Анализ кривой на рис. 2.7 позволяет сделать следующий вывод.

Допущение, принятое в методике [2], о плавной параболической форме кривой упругой деформации по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой нуждается в корректировке: кривая на рис. 2.7 имеет неплавную и непараболическую форму. Наибольшая упругая деформация наблюдается на среднем участке бочки длиной около $0,9b_{п}$, где кривая изменяется плавно. За пределами этого участка, в зонах контакта с боковыми кромками полосы, кривая имеет резкие перепады в направлении к торцам бочки.

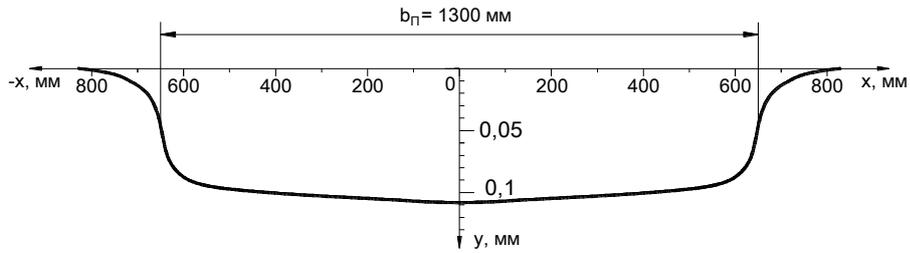


Рис. 2.7. Кривая упругих деформаций нижнего рабочего валка пятиклетового стана 1700 в вертикальной плоскости, полученная из трехмерной модели распределения деформаций валкового узла (рис. 2.6): x – расстояние от середины бочки; y – упругие деформации точек поверхности относительно деформации краев бочки

Далее, согласно [1], применяя принцип суперпозиции кривых упругих деформаций и теплового профиля, можно получить окончательный профиль бочки рабочего валка в вертикальной осевой плоскости со стороны контакта с прокатываемой полосой – его активную образующую (износ при холодной прокатке можно не учитывать, т.к. рабочие валки имеют высокую твердость и износостойкость и планово заменяются каждые 6-8 часов).

Результат применения этого принципа показан на рис. 2.8: суперпозиция кривой 1 упругой деформации нижнего рабочего валка, имеющего шлифовочную профилировку $\Delta D_{ш.р} = 0,1$ мм, контактирующего с опорным валком, имеющим шлифовочную профилировку $\Delta D_{ш.оп} = 0,4$ мм, с кривой теплового профиля 2 (с учетом противоположного направления упругих и тепловых деформаций) дала кривую 3 – активную образующую рабочего валка, определяющую контур поперечного профиля полосы и его расчетную поперечную разнотолщинность:

$$\delta h_{\text{поп}} = h_c - h_b, \quad (2.4)$$

где h_c , h_b – толщины в середине и у боковой кромки.

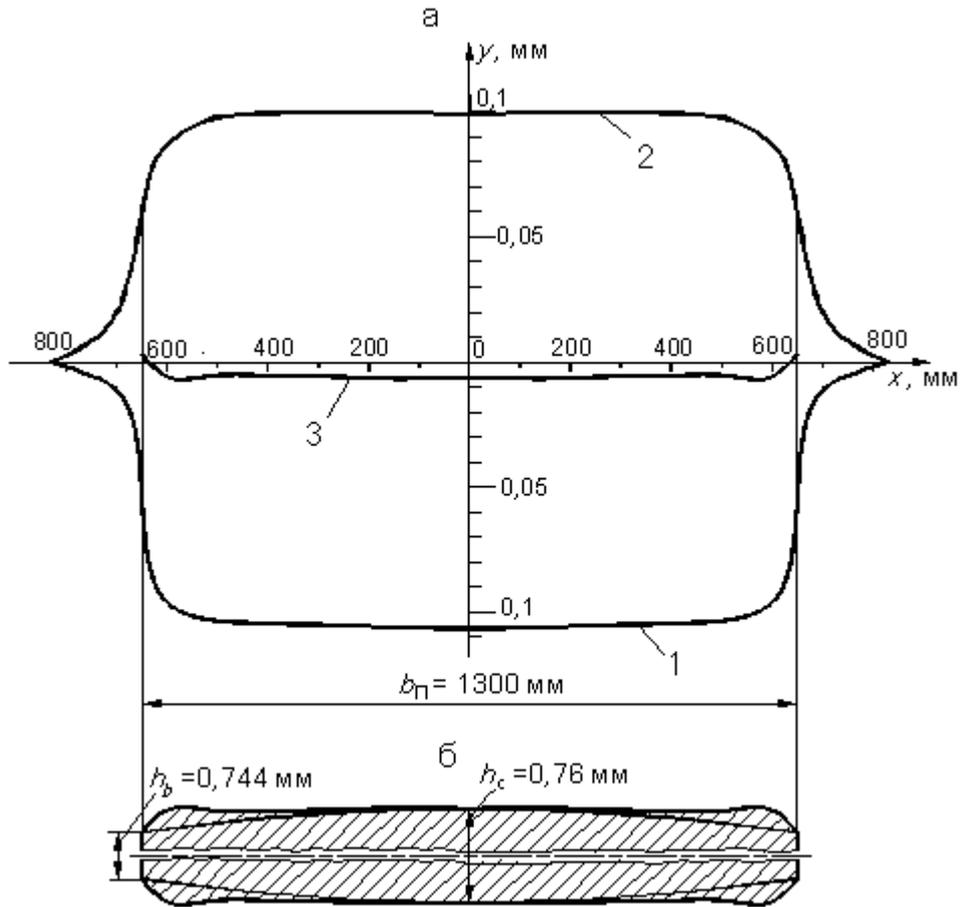


Рис. 2.8. Определение поперечного профиля полосы:
 а – суперпозиция кривых упругих деформаций и теплового профиля валков;
 б – поперечный профиль полосы

Согласно данным расчетов, подтвержденным измерениями на стане 1700 [1, 2], тепловая выпуклость на длине бочки (разность диаметров в середине и у торца бочки) $\Delta D_{\text{тепл.р.}} = 0,20$ мм, тепловая выпуклость на ширине полосы (разность диаметров в середине бочки и в сечении, соответствующем боковой кромке полосы) $\Delta D_{\text{тепл.р.б}} = 0,086$ мм.

Результаты моделирования деформаций верхнего и нижнего валковых узлов, 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, $\frac{\delta h_{\text{поп}}}{h_c} \cdot 100\% = 2,1\%$.

Фактическая поперечная разнотолщинность полосы, прокатанной на пятиклетевом стане 1700 по режиму, приведенному в табл. 2.1, находилась в диапазоне 1,5-2,2% от h_c . Как видно, расчетная поперечная разнотолщинность полосы попала в диапазон фактических значений, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

2.3. Исследование шлифовочных профилировок валков с помощью разработанной модели

Поскольку в клетях «кварто» опорные валки чаще всего выполняют с коническими скосами по краям бочки, по методике, описанной в п.2.1, были созданы и исследованы два варианта сеточной модели валкового узла пятой клетки пятиклетевого стана холодной прокатки 1700, с номинальными диаметрами бочек рабочего и опорного валков $D_p = 600$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм, при прокатке полосы шириной $b_n = 1300$ мм, толщиной $h = 1$ мм. Номинальные длины бочек валков на этом стане равны: рабочего – $L_p = 1700$ мм, опорного $L_{оп} = 1600$ мм. Для повышения точности определения упругих деформаций в сеточной модели было учтено наличие фасок у торцов бочек; длина каждой фаски у бочки рабочего валка равна 20 мм, опорного валка 40 мм. Таким образом, фактические длины бочек в сеточной модели были приняты: $L_p = 1660$ мм, опорного $L_{оп} = 1520$ мм.

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.

Шлифовочные профилировки валков задавали в реальных диапазонах, применяемых в производстве: бочка опорного валка – выпуклая, параболическая, с величиной выпуклости $\Delta D_{шл.оп} = 0,4$ мм, бочка рабочего валка – выпуклая, цилиндрическая или вогнутая, с величиной выпуклости (вогнутости) $\Delta D_{шл.р} = \pm 0,1$ мм.

Полученные в результате моделирования активные образующие верхнего рабочего валка в вертикальной осевой плоскости в контакте с прокатываемой полосой показаны на рис. 2.9 на примере рабочего валка со шлифовочной выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм.

Анализ кривых на рис. 2.9 позволяет сделать следующие выводы:

1. Не только кривые упругой деформации валков, но и контуры поперечного профиля полосы имеют неплавную и непараболическую форму.

2. Выполнение скосов по краям бочки опорных валков уменьшает разность упругих деформации рабочих валков в середине бочки и в сечениях, где они контактируют с кромками полосы, при наличии скосов (кривая 1) в 1,5 раза меньше, чем при использовании опорных валков без скосов (кривая 2). Это объясняется тем, что в рассматриваемом варианте сеточной модели активная длина межвалкового контакта $L_{\text{акт}} = L_{\text{оп}} - 2l_{\text{ск}}$ ($l_{\text{ск}}$ – длина одного скоса) примерно равна ширине полосы.

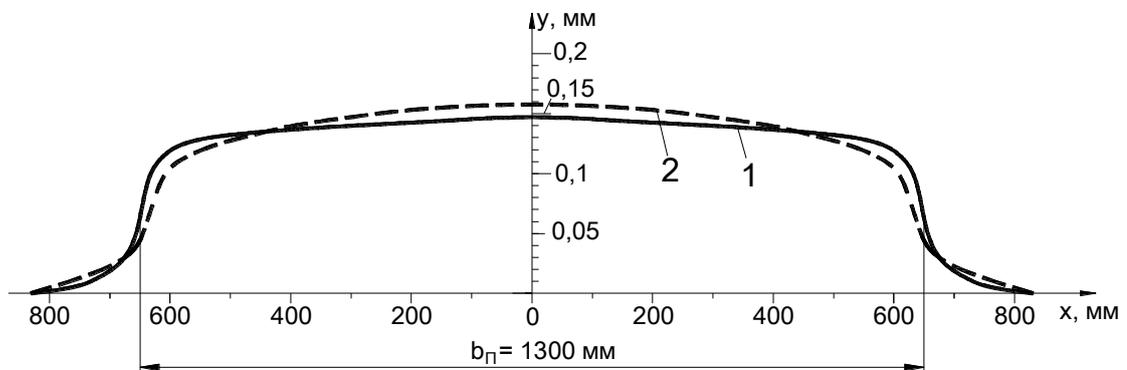


Рис. 2.9. Кривые упругих деформаций верхнего рабочего валка 5^й клетки пятиклетевого стана 1700 в вертикальной плоскости при прокатке полосы шириной 1300 мм и толщиной 1 мм (D_p , $D_{\text{оп}}$, $\Delta D_{\text{шл.р}}$, $\Delta D_{\text{шл.оп}}$ указаны в тексте): 1 – опорные валки со скосами длиной по 100 мм; 2 – опорные валки без скосов; x – расстояние от середины бочки; y – упругие деформации точек поверхности относительно деформации краев бочки

Каждая из кривых упругих деформаций рабочего валка, показанных на рис. 2.9, представляет собой только упругую составляющую активной

образующей и геометрически суммируется с кривой теплового профиля его бочки, в результате получается окончательный профиль бочки верхнего рабочего валка в вертикальной осевой плоскости, со стороны контакта с прокатываемой полосой – его активная образующая. Это построение и его результаты показаны на рис. 2.10 для двух вариантов профиля бочки опорного валка: *a* – со скосами длиной по 100 мм, *б* – без скосов.

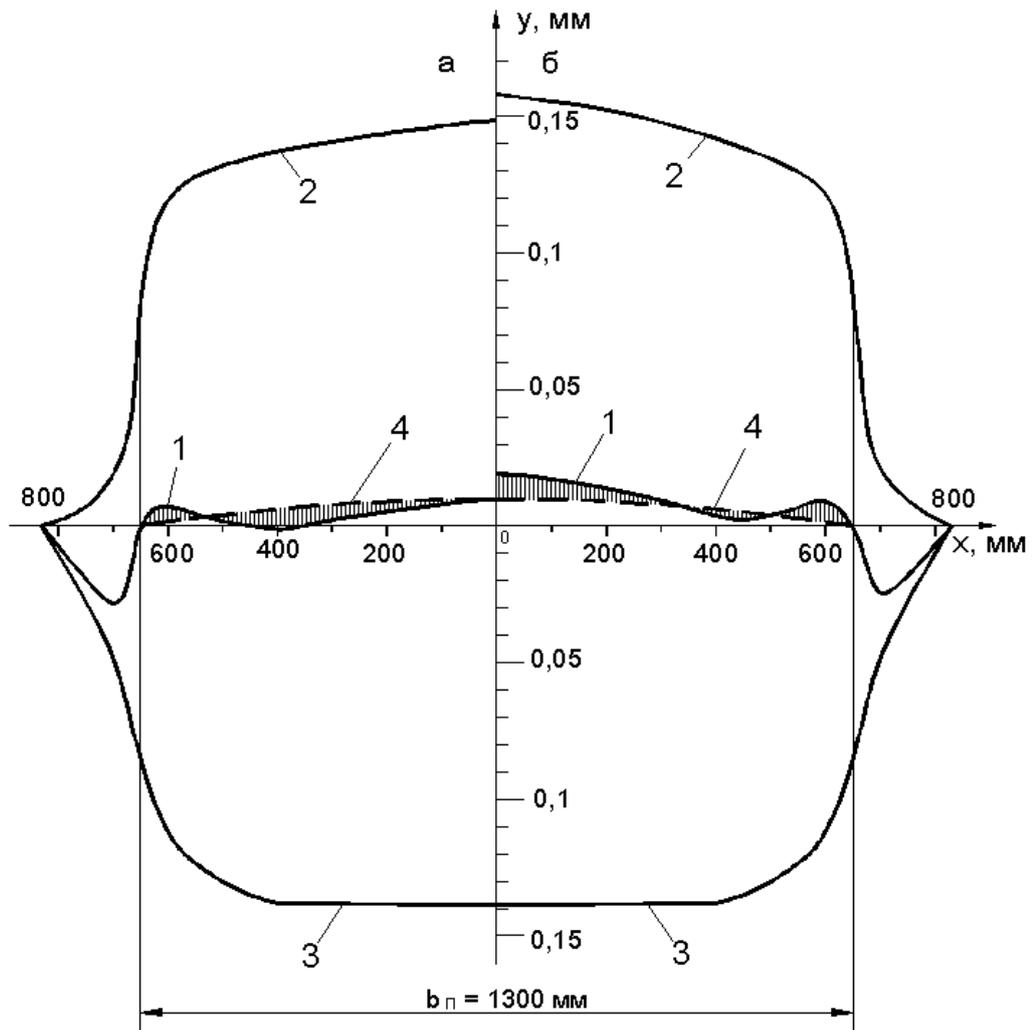


Рис. 2.10. Активная образующая верхнего рабочего валка *1* и метод ее построения путем суперпозиции кривых упругой деформации *2* и теплового профиля *3* для двух вариантов шлифовочного профиля опорного валка: *a* – со скосами длиной 100 мм; *б* – без скосов, (5^я клеть стана 1700, ширина и номинальная толщина полосы: $b = 1300$ мм и $h_n = 1$ мм; *4* – нормативная форма поверхности поперечного профиля полосы; заданная поперечная разнотолщинность 0,02 мм или 2 % от h_n)

Кривая теплового профиля 3 на графиках рис. 2.10 построена по методике [2]. Согласно этой методике, тепловой профиль при равномерных обжатиях по ширине полосы имеет постоянную величину в средней зоне бочки, длина которой равна примерно $2/3$ ширины прокатываемой полосы, а за пределами этой зоны резко уменьшается в направлении торцов бочки.

Как видно из графиков рис. 2.10, поперечная разнотолщинность полосы равна:

а) при наличии скосов на опорном валке: $\delta h_{\text{поп}} = 0,02$ мм;
 $\frac{\delta h_{\text{поп}}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\% = 2\%$ ($h_{\text{ном}} = 1$ мм – заданная (номинальная) толщина полосы);

б) при отсутствии скосов на опорном валке: $\delta h_{\text{поп}} = 0,04$ мм;
 $\frac{\delta h_{\text{поп}}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100\% = 4\%$.

Анализ активных образующих, показанных на рис. 2.10, дает основание для следующих выводов:

1. При использовании опорных валков как со скосами, так и без скосов форма кривой активной образующей не является плавной и существенно отличается от плавной нормативной формы наружной поверхности поперечного профиля полосы. Местные отклонения толщины на ширине полосы составляют: в варианте «а» (со скосами) до 0,02 мм; в варианте «б» (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, 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. 2.10.

Вариант такой скорректированной профилировки со шлифовочной выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм показан на рис. 2.11.

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. 2.11, и его теплового профиля дает активную образующую с отклонениями от плавной формы, не превышающими 0,005 мм.

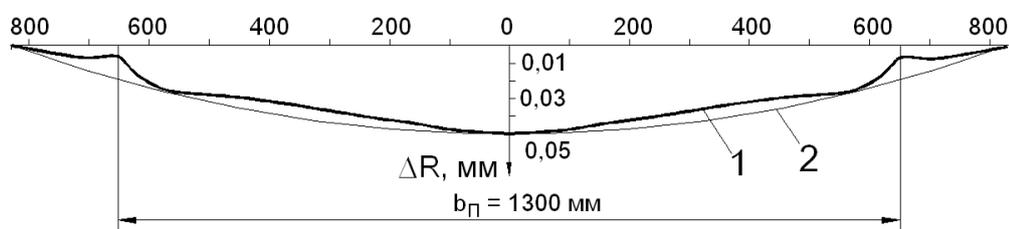


Рис. 2.11. Скорректированная шлифовочная профилировка верхнего рабочего валка с выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм: 1 – скорректированный профиль; 2 – обычный профиль (опорный валок со скосами длиной 100 мм и глубиной 2,5 мм; ΔR – отклонение радиуса бочки от минимального значения)

Однако следует учитывать, что в течение межперевалочного периода рабочих валков обычно прокатывают полосы различной ширины, от максимальной до минимальной. Поэтому необходимо провести построения, показанные на рис. 2.10 и 2.11, как минимум для трех ширин сортамента: максимальной (b_{max}), минимальной (b_{min}) и средней (b_{cp}), 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. На рис. 2.12 и 2.13 показаны полученные шлифовочные профилировки рабочего валка с выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм для ширины полос 1000 мм и 1600 мм соответственно: 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).

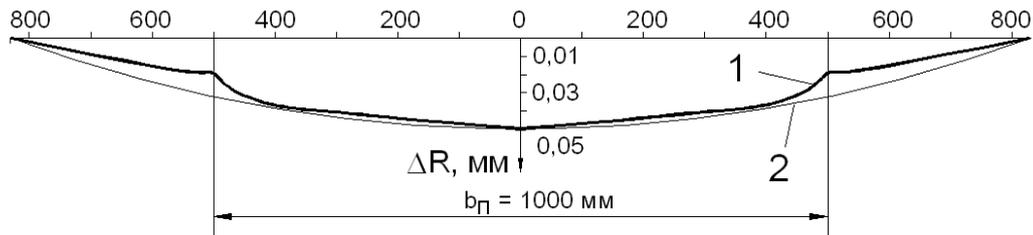


Рис. 2.12. Шлифовочная профилировка верхнего рабочего валка, построенная для ширины полосы 1000 мм

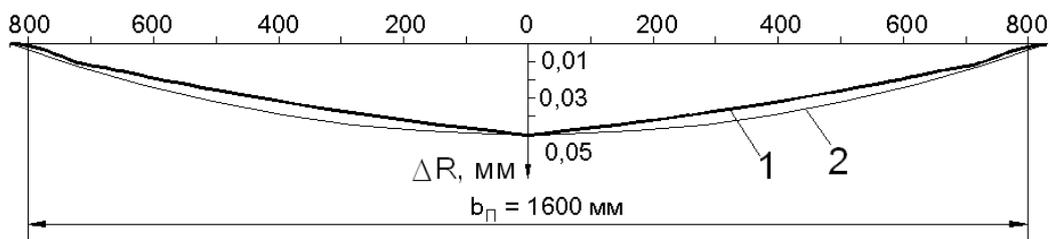


Рис. 2.13. Шлифовочная профилировка верхнего рабочего валка, построенная для ширины полосы 1600 мм

Далее скорректированные профилировки (рис. 2.11-2.13) были наложены друг на друга, выполнены плавные сопряжения отклонений и получена окончательная усредненная форма шлифовочной кривой, показанная на рис. 2.14.

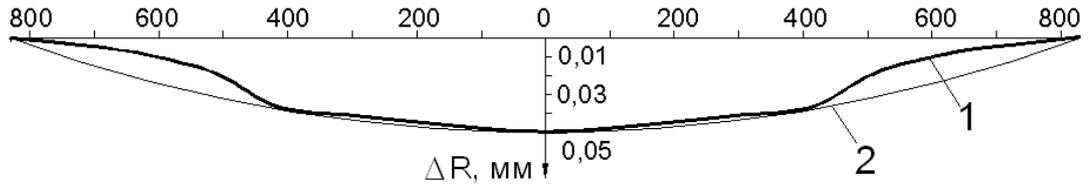


Рис. 2.14. Усредненная шлифовочная профилировка рабочего валка с выпуклостью $\Delta D_{\text{шл.р}} = 0,1$ мм: 1 – скорректированный (усредненный) профиль; 2 – обычный профиль (опорный валок со скосами длиной 100 мм и глубиной 2,5 мм; ΔR – отклонение радиуса бочки от минимального значения)

Результат суперпозиции кривой упругой деформации рабочего валка с профилировкой, показанной на рис. 2.14, и кривой теплового профиля показан на рис. 2.15: вариант *a* – при ширине полосы 1600 мм, *б* – при

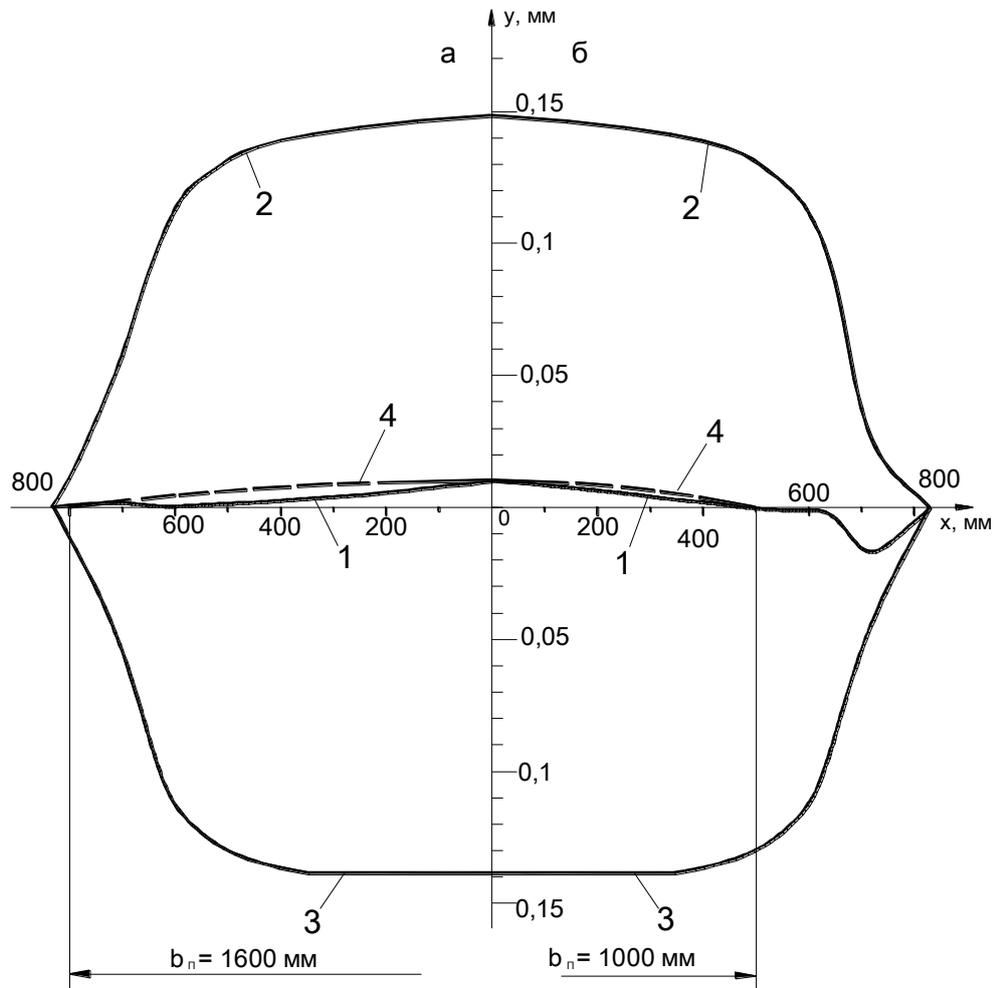


Рис. 2.15. Активная образующая верхнего рабочего валка 1 и метод ее построения путем суперпозиции кривых упругой деформации 2 и теплового профиля 3 для двух вариантов: *a* – ширина полосы 1600 мм; *б* – ширина полосы 1000 мм, (4 – нормативная форма поверхности поперечного профиля полосы)

ширине 1000 мм. Как видно из графиков, поперечная разнотолщинность в обоих случаях не превышает заданного – 0,02 мм или 2 % от h_n .

2.4. Разработка нового метода профилирования опорных валков толстолистого стана 5000

Чем шире прокатываемая полоса и длина бочки валков, тем больше возникает при прокатке проблем, связанных с неравномерностью распределения давлений по длине межвалкового контакта.

Технологическая практика одного из станов с наиболее длинной бочкой – толстолистого 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 разработки системы профилировок опорных валков стана 5000 были проанализированы данные о профилировках, износе, поверхностных дефектах валков, колебаниях толщины по длине и ширине листов. Чтобы выполнить этот анализ, была разработана компьютерная модель системы профилировок валков на базе изложенной выше новой методики и адаптирована к параметрам технологии стана 5000. Расчеты по разработанной модели показали, что расчетные поперечные разнотолщинности полосы оказались близки к фактическим.

В качестве исходных данных в модель вводили размеры и профилировки валков, ширину листов и величину силы прокатки, распределенной по ширине листа.

Ниже приведены полученные графики напряжений: на рис. 2.16 и 2.17 – напряжения в межвалковом контакте при прокатке самого узкого листа ($b = 2098$ мм) (рис. 2.16 – опорный валок с одинарными скосами; рис. 2.17 –

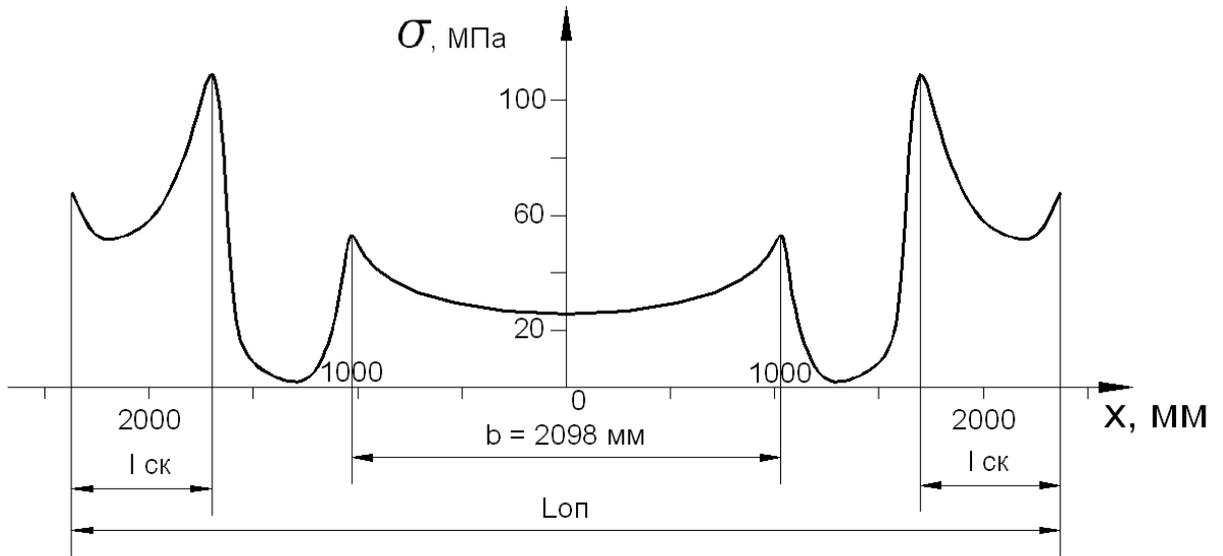


Рис. 2.16. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка с одинарными скосами (650x1,5 мм) в контакте с рабочим валком; $L_{оп}$ – длина бочки опорного валка (указана за вычетом фасок); $l_{ск}$ – длина скоса

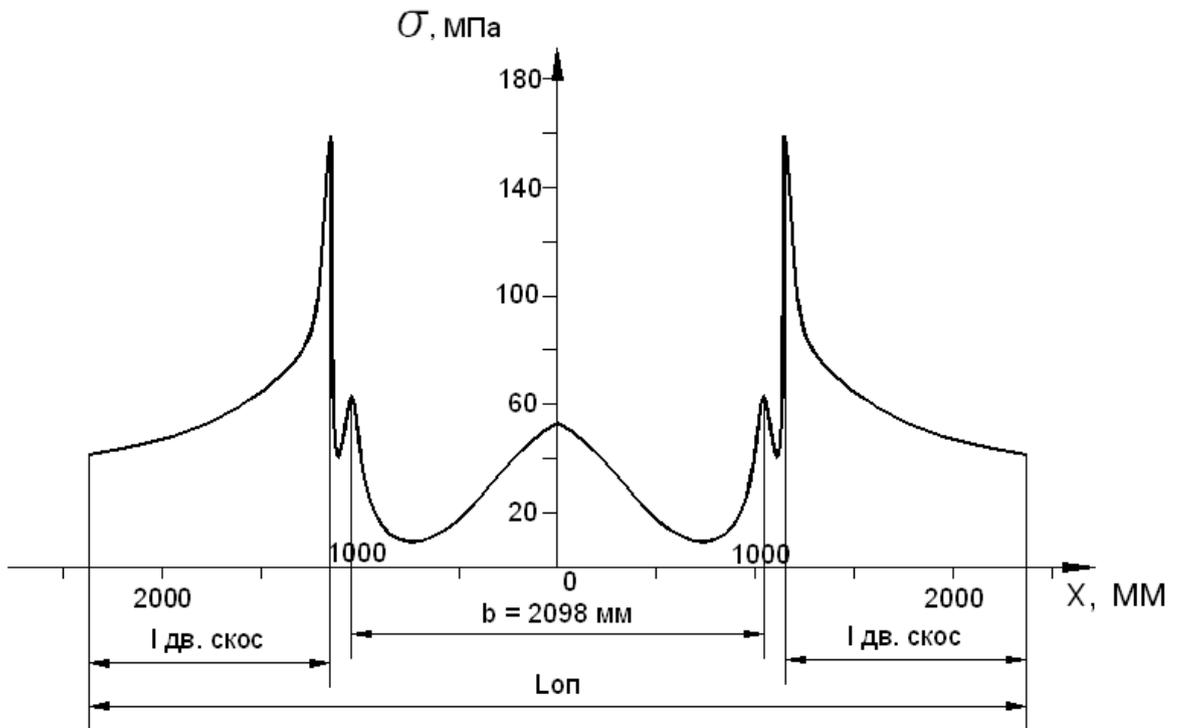


Рис. 2.17. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка с двойными скосами (600x0,8 мм и 600x0,7 мм) в контакте с рабочим валком; $l_{дв.ск.}$ – длина двойного скоса

опорный валок с двойными скосами); на рис. 2.18 и 2.19 – то же, что на рис. 2.16 и 2.17, но при прокатке самого широкого листа ($b = 4752$ мм). Размеры валков: $D_p = 1120$ мм; $D_{оп} = 2350$ мм.

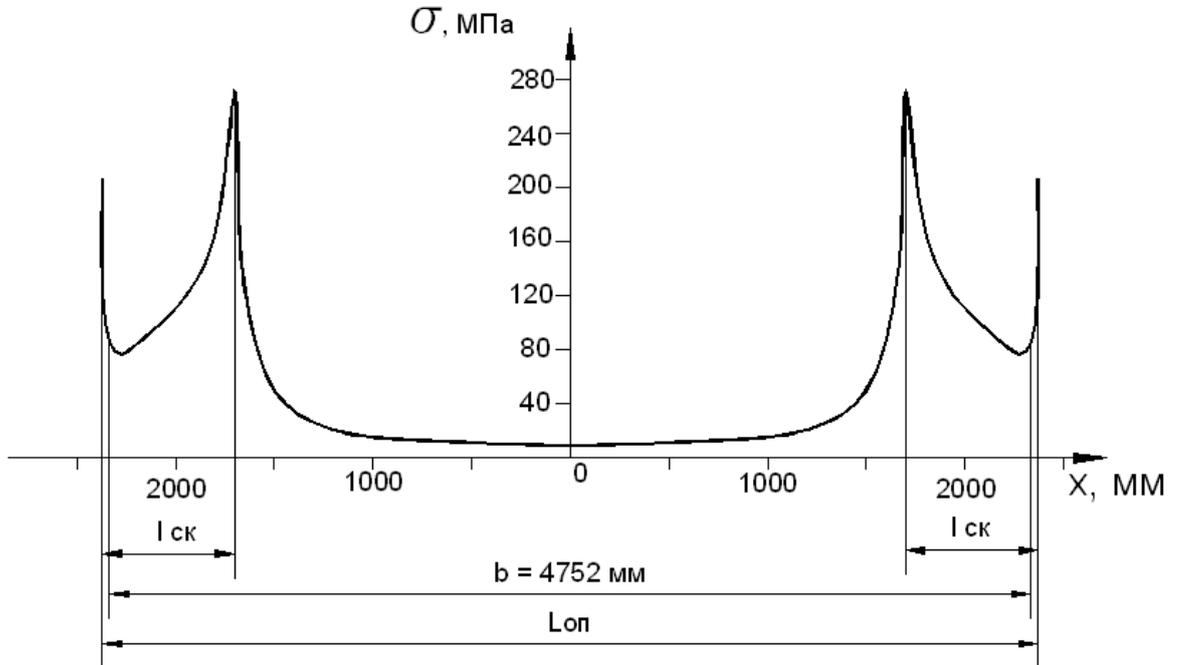


Рис. 2.18. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка с одинарными скосами (650x1,5 мм) в контакте с рабочим валком; $L_{оп}$ – длина бочки опорного валка (указана за вычетом фасок); $l_{ск}$ – длина скоса

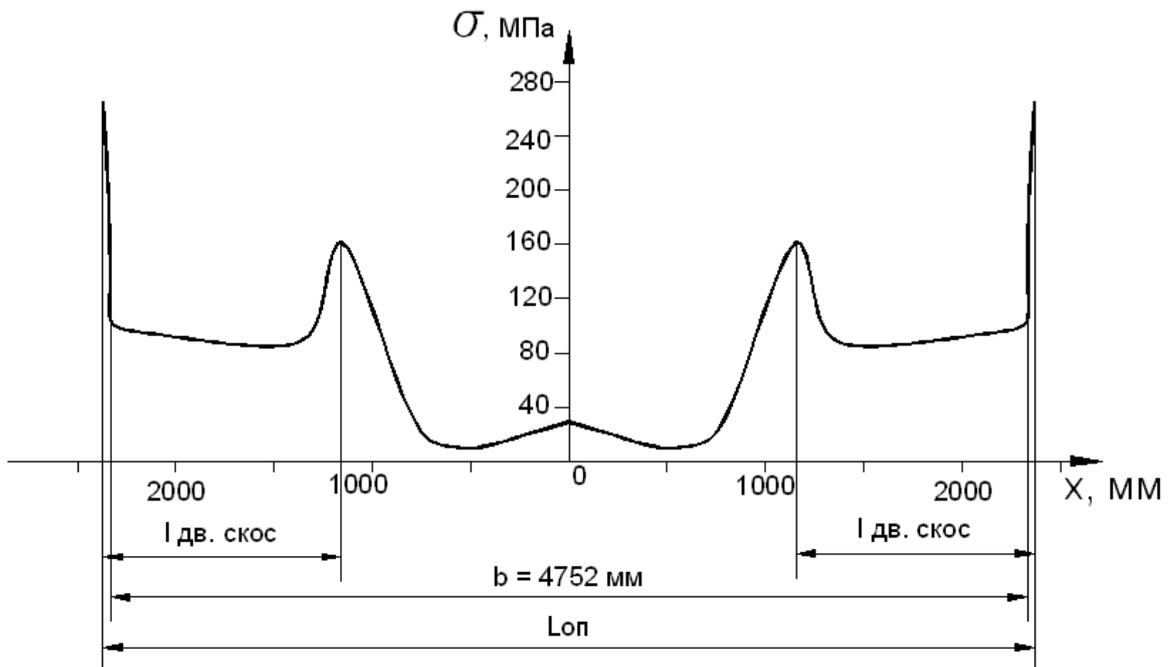


Рис. 2.19. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка с двойными скосами (600x0,8 мм и 600x0,7 мм) в контакте с рабочим валком; $l_{дв.ск.}$ – длина двойного скоса

Из графиков рис. 2.16-2.19 видно, что на опорный валок и с одинарными, и с двойными скосами действуют пиковые значения напряжений со стороны рабочего валка 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 равны:

- при ширине листа 2098 мм: 100-150 МПа;
- при ширине листа 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.

Упругую деформацию активной образующей рабочего валка получали с помощью САЕ-системы, а затем пристраивали к ней методом суперпозиции шлифовочную профилировку (по существующей технологии – рабочие валки либо цилиндрические, либо имеют параболическую вогнутость 0,1-0,3 мм на диаметр) и усредненный тепловой профиль, рассчитанный по апробированной методике [4]. Анализ показал, что рабочие валки в середине бочки имеют температуру 90-100°С, а на свободных от полосы концах 28-30°С, т.е. их тепловая выпуклость усредненно равна: $\Delta D_{p, \text{тепл.}} = 0,9-1,0$ мм (при $D_p \approx 1100$ мм), и распределяется она по параболе, т.к. температура листа по его ширине не постоянна: максимальную температуру он имеет примерно на половине ширины, а к боковым кромкам она уменьшается на 60-100°С.

На рис. 2.20 приведен пример построения активной образующей верхнего рабочего валка описанным методом при прокатке самой широкой полосы ($b=4752$ мм), для случая, когда опорный валок имеет двойные скосы.

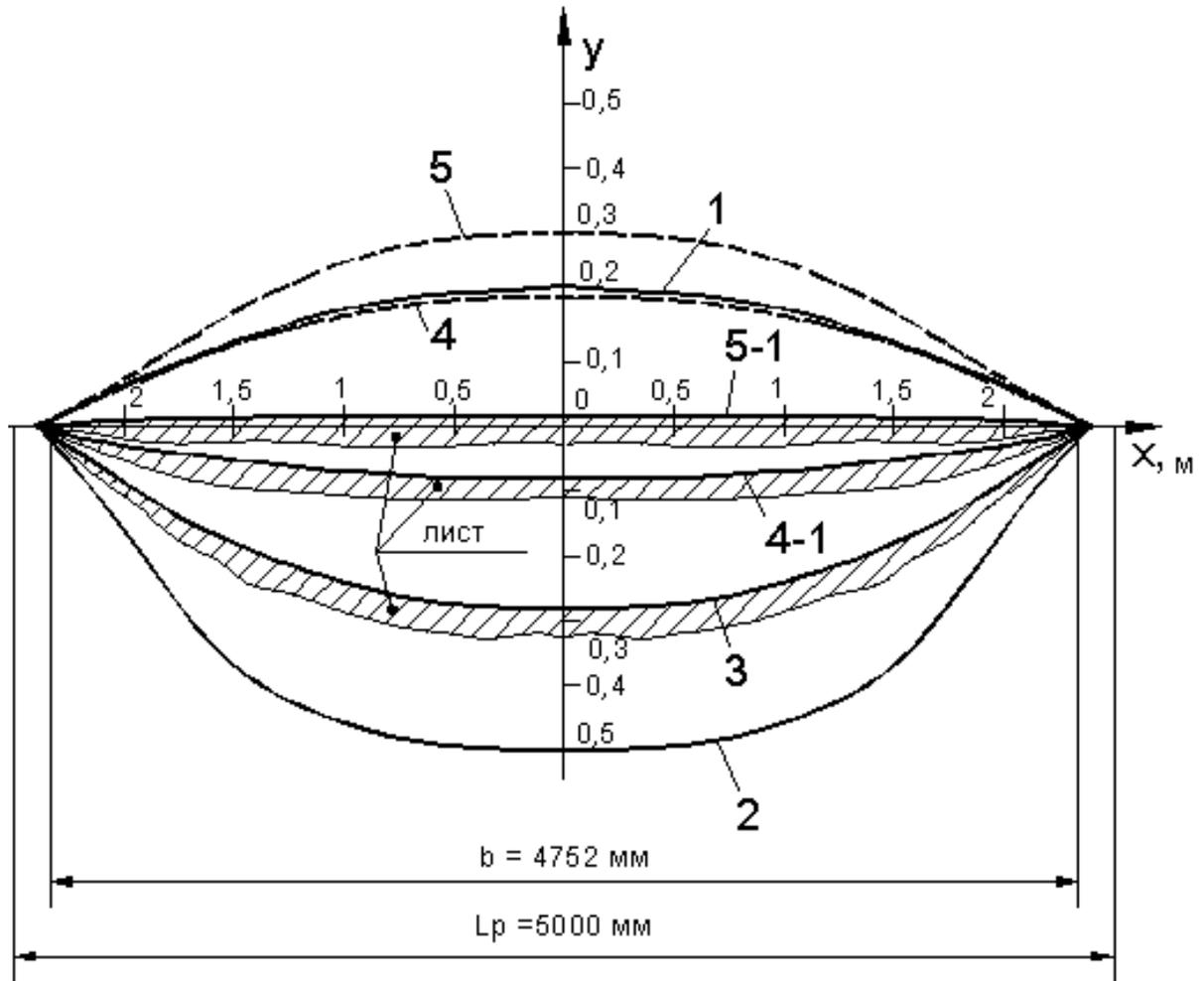


Рис. 2.20. Схемы построения активных образующих верхнего рабочего вала путем суперпозиции кривых упругой деформации *1*, теплового профиля *2* и шлифовочного профиля в трех вариантах: 1-й вариант: $\Delta D_{\text{шл.}} = 0$ – активная образующая *3*; 2-й вариант: $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,4$ мм – шлифовочная кривая *4*; активная образующая *4-1*; 3-й вариант: $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,6$ мм – шлифовочная кривая *5*; активная образующая *5-1*. **1** – кривая упругой деформации; **2** – тепловой профиль бочки; **3** – активная образующая при $\Delta D_{\text{шл.}} = 0$ (валок цилиндрический); **4** – шлифовочный профиль $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,4$ мм; **4-1** – активная образующая при шлифовочной кривой *4*; **5** – шлифовочный профиль $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,6$ мм; **5-1** – активная образующая при шлифовочной кривой *5*

Как видно из схем рисунка 2.20, если валок отшлифован цилиндрическим ($\Delta D_{\text{шл.}} = 0$), то поперечный профиль листа вогнутый, с разнотолщинностью $\delta h_{\text{поп.}} = -0,56$ мм.

Если шлифовочная вогнутость $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,4$ мм, то поперечный профиль листа также вогнутый, но поперечная разнотолщинность $\delta h = -0,14$ мм.

Если увеличить шлифовочную вогнутость до $\Delta D_{\text{шл.}} = -0,6$ мм, то поперечный профиль листа становится выпуклым: $\delta h_{\text{под.}} = +0,04$ мм.

Таким образом, анализ показал, что варьируя шлифовочную вогнутость бочки рабочего валка в диапазоне $\Delta D_{\text{шл.}} = 0 \div (-1$ мм), можно получать листы с выпуклым, вогнутым или близким к прямоугольному поперечным профилем.

Следовательно, 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 вышеописанной методике разные варианты профилировок бочек опорных валков, была разработана принципиально новая профилировка опорного валка, показанная на рис. 2.21.

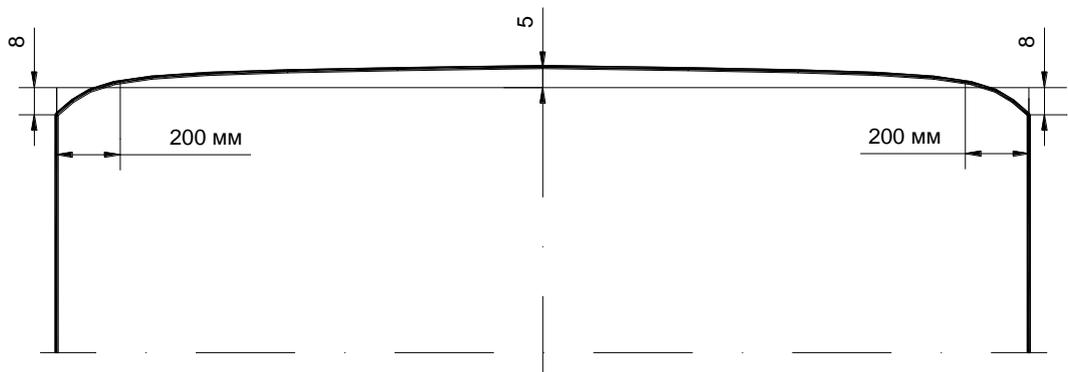
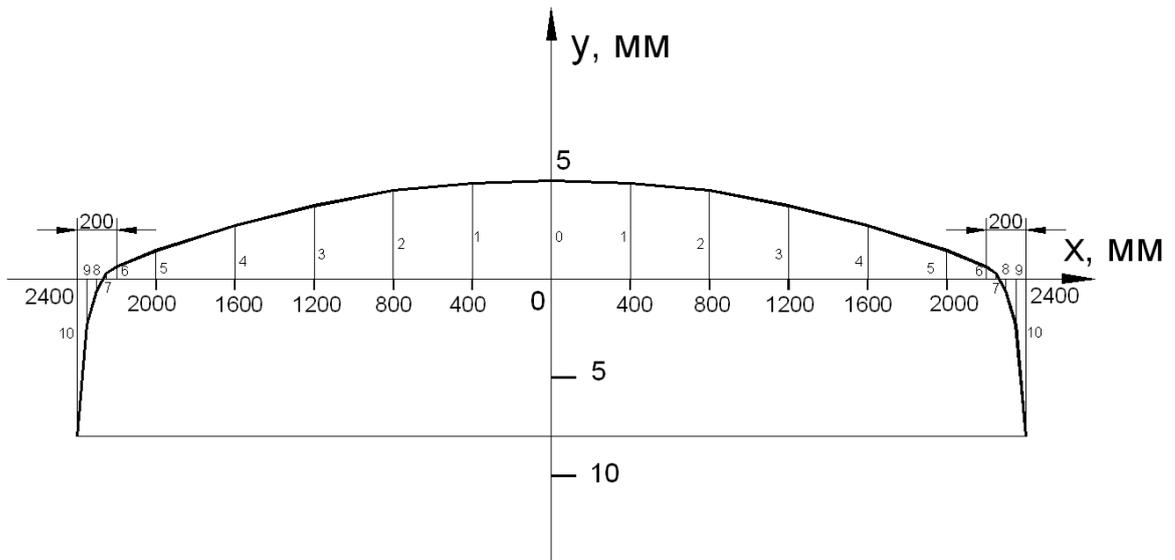


Рис. 2.21. Предлагаемая профилировка опорного валка

Значения профилировки опорного валка с привязкой к длине бочки показаны на рис. 2.22 (горизонтальная ось совпадает с направлением оси валка).



№	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	4,858	4,497	3,718	2,721	1,439	0,692	0,279	-0,626	-2,329	-8

Рис.2.22. Профилировка опорного валка и ее размеры с привязкой к длине бочки

Новизна профилировки, показанной на рис. 2.21 и 2.22, 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 валка.

Выбор формы среднего участка профиля валка в виде выпуклой параболы определяется тем, что при прогибе валка линия изгиба, как известно, принимает форму вогнутой параболы, компенсируя таким образом выпуклость профиля. В рабочем состоянии, вследствие этого, опорный валок будет контактировать с рабочим валком по поверхности, более близкой к цилиндрической, что обеспечит контакт между валками с минимальной неравномерностью практически на большей зоне рабочей длины бочки, за счет этого межвалковые контактные напряжения на единицу длины будут существенно снижены.

Выбор формы краевых участков также в виде параболы определяется теми же соображениями, причем эти участки профиля одновременно выполняют функцию плавного сопряжения среднего участка с торцом бочки.

Выбор стрелы выпуклости краевых парабол (т.е. расстояния в радиальном направлении от точек сопряжения со средним участком до торца) определяется достаточностью формы этого скругления для снятия пиков контактных напряжений. Этот результат также выявлен расчетами.

Исключение резких переходов между краевыми кривыми, средней параболической кривой и торцом бочки, выполнение всех сопряжений профилировки таким образом, чтобы у сопряженных кривых были общие касательные, оптимальный выбор длины и стрелы выпуклости участков краевых кривых обеспечивают существенное уменьшение контактных напряжений в межвалковом контакте.

На рис. 2.23 и 2.24 показаны построенные с помощью САЕ-системы графики распределения напряжений в межвалковом контакте при выполнении опорного вала с новой профилировкой (рис. 2.23 – при прокатке листа шириной 2098 мм; рис. 2.24 – при прокатке листа шириной 4752 мм).

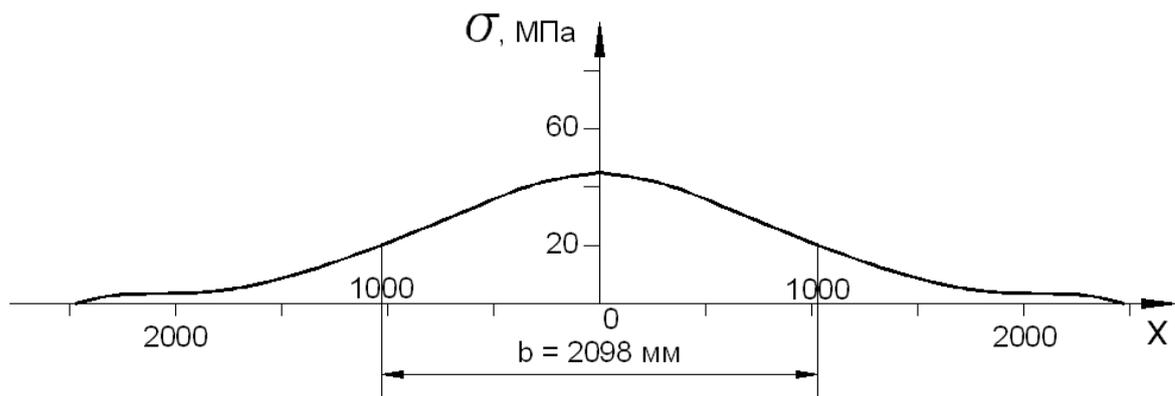


Рис. 2.23. Распределение напряжений по длине бочки опорного вала с новой профилировкой в контакте с рабочим валком при прокатке листа шириной 2098 мм

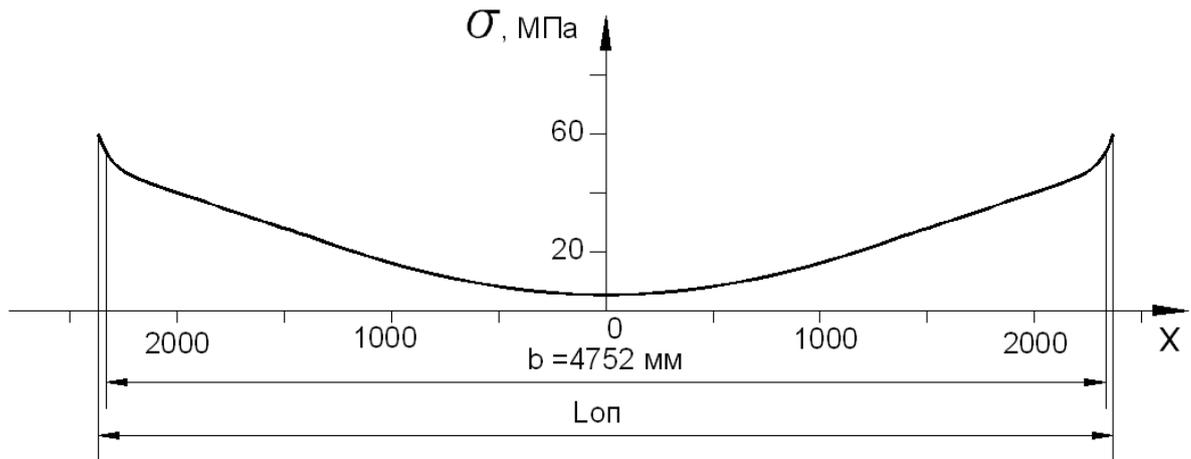


Рис. 2.24. Распределение напряжений по длине бочки опорного вала с новой профилировкой в контакте с рабочим валком при прокатке листа шириной 4752 мм

Из графиков видно, что пики напряжений в межвалковом контакте исчезли, а максимальные значения напряжений не превышают 40-60 МПа.

Также было выполнено моделирование контактных напряжений, действующих на опорный валок, при выполнении новой профилировки опорного вала по скорректированным вариантам: 1-й вариант – с уменьшенной выпуклостью профиля до 3 мм на радиус; 2-й вариант – с увеличенной длиной участков дополнительных закруглений образующей бочки до 400 мм (вместо 200 мм) и с уменьшенной глубиной этих закруглений у торцов бочки до 5 мм (вместо 8 мм).

В первом варианте при прокатке узкого листа напряжения в средней части бочки снижаются на 15 МПа (рис. 2.25), а при прокатке широкого (рис. 2.26), наоборот, наблюдается небольшое увеличение напряжений, однако максимальные напряжения невелики (около 60 МПа), т.е. существенного улучшения условий межвалкового контакта не происходит.

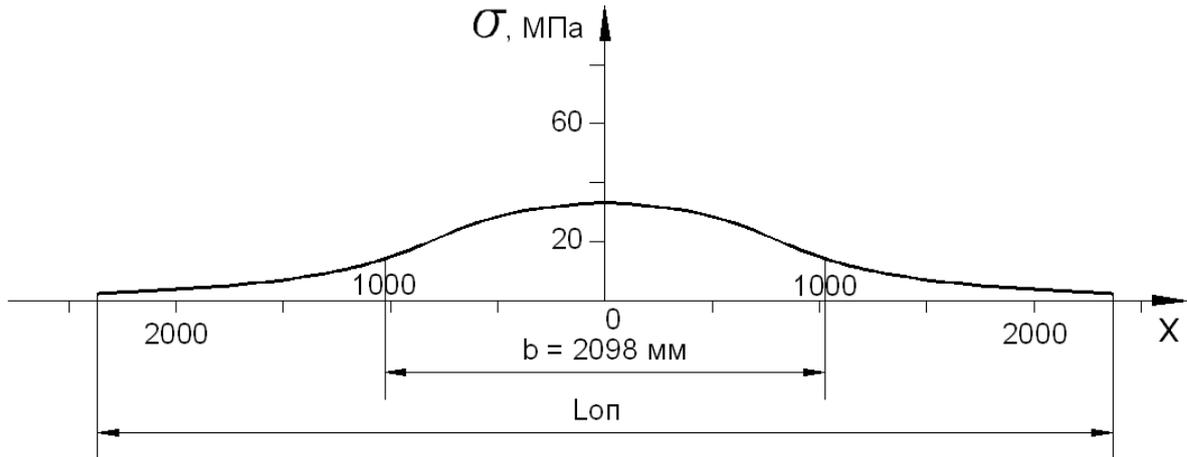


Рис. 2.25. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка в контакте с рабочим валком с выпуклостью профиля опорного валка 3 мм на радиус ($b = 2098$ мм)

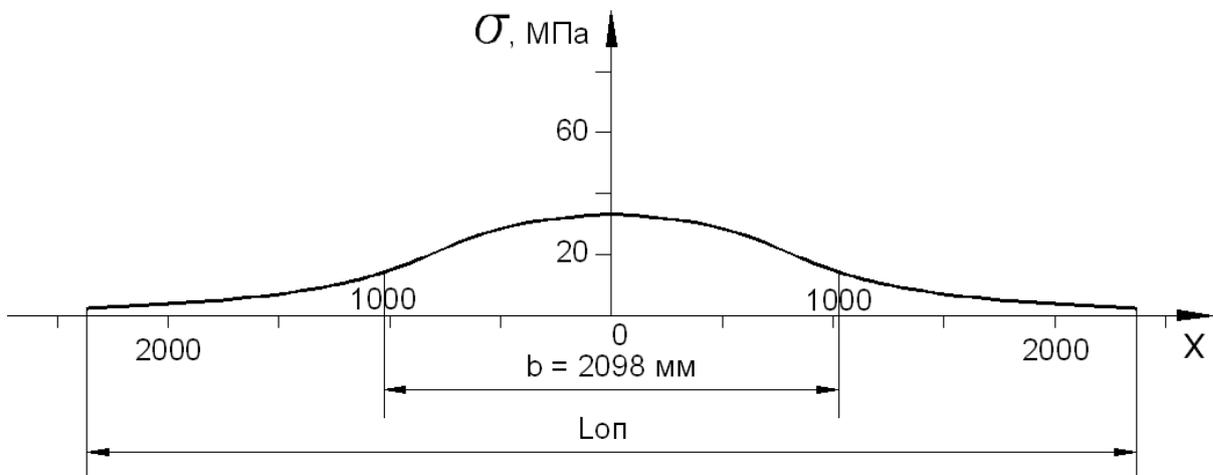
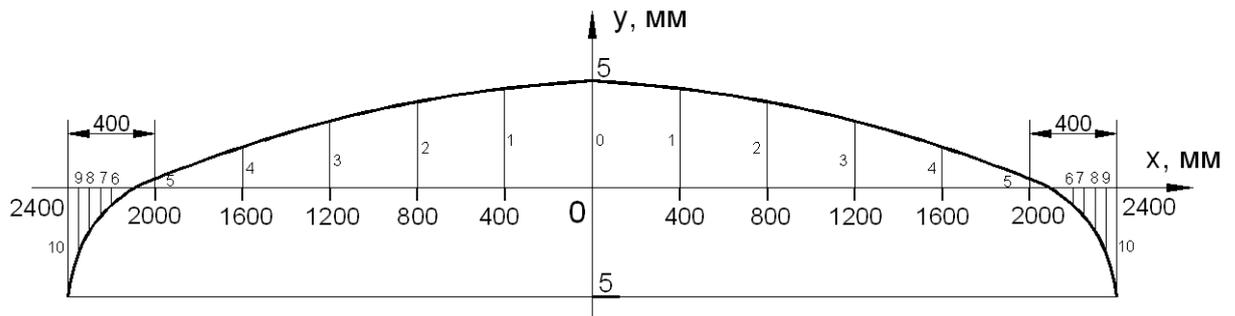


Рис. 2.26. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка в контакте с рабочим валком с выпуклостью профиля опорного валка 3 мм на радиус ($b = 4752$ мм)

Второй вариант (рис. 2.27) был рассмотрен как альтернативный, из-за возможной сложности выполнения предложенной профилировки на существующем вальцешлифовальном станке КЖ 3404. Как видно из



№	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. 2.27. Скорректированная профилировка опорного валка и ее размеры с привязкой к длине бочки

прилагаемых графиков рис. 2.28 и 2.29, результат моделирования положительный: при прокатке узкого листа характер распределения и величины напряжений не изменяются, а при прокатке широкого листа наблюдаются небольшие пиковые напряжения на расстоянии 290-300 мм от торца бочки опорного валка, максимальной величиной 50-55 МПа, которая в 3-5 раз меньше, чем при существующей на стане системе профилировок валков.

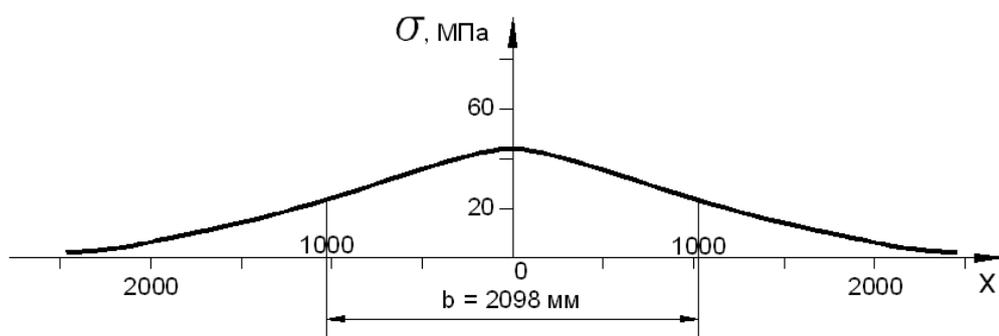


Рис. 2.28. Распределение напряжений по длине бочки опорного валка в контакте с рабочим валком с профилировкой опорного валка, представленной на рис. 2.27, при прокатке листа минимальной ширины

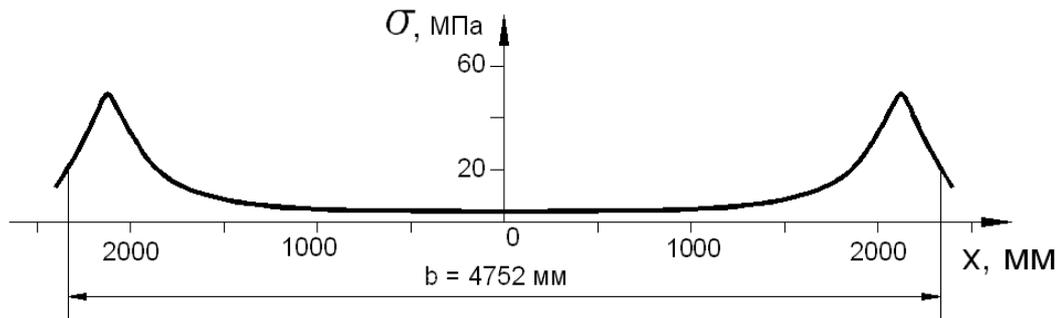


Рис. 2.29. Распределение напряжений по длине бочки опорного вала в контакте с рабочим валком с профилировкой опорного вала, представленной на рис. 2.27, при прокатке листа максимальной ширины

Таким образом, к испытаниям на стане 5000 принята следующая система профилировок:

1. Профиль образующей поверхности бочки опорного вала выполняют в форме участков трех выпуклых парабол: одного – в средней части бочки с выпуклостью 5 мм на радиус и двух сопряженных с ним по краям бочки, 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. Длина участка краевой параболы по оси бочки составляет 4-8 % от длины бочки, а точка сопряжения ее со средней параболой в радиальном направлении отстоит от точки сопряжения ее с торцом бочки на 5-10 мм.

2. Профили бочек рабочих валков выполняют с плавной параболической вогнутостью каждой глубиной 0,3-0,4 мм на диаметр (несколько увеличенной по сравнению с выполняемой в настоящее время).

Выполнить предложенную профилировку опорного вала на существующем вальцешлифовальном станке КЖ 3404 ЛПЦ-3 ОАО «Северсталь» возможно после модернизации его механизма тонких подач шлифовального круга и установки на нем измерительной системы профиля

валка. Первый этап испытаний на стане 5000 новой системы профилировок валков планируется в августе 2015 г.

Выводы по главе 2

1. Разработана новая методика моделирования шлифовочных профилировок валков листовых станов с применением метода конечных элементов, отличающаяся от известных возможностью получения профиля бочки рабочего валка в виде непрерывной кривой.

2. Усовершенствован метод моделирования упругих деформаций валков рабочих клеток 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.

3. Установлено, что кривая упругих деформаций по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой имеет неплавную и непараболическую форму и существенно отличается от формы кривой, принимаемой в известных моделях.

4. Представлены результаты исследования профилировок валков с помощью новой методики. Показано, что использование метода конечных элементов позволяет построить шлифовочную профилировку валка сложной формы, которая в значительной мере устраняет неравномерность обжатий и вытяжек по ширине прокатываемой полосы.

5. Разработана и принята к испытанию на толстолистовом стане 5000 принципиально новая профилировка опорных валков, исключая их преждевременные поверхностные разрушения: профиль образующей поверхности бочки опорного валка выполнен в форме участков трех выпуклых парабол: одного – в средней части бочки, и двух сопряженных с ним по краям бочки, 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 валка. Длина участка краевой параболы по оси бочки составляет 4-8 % от длины бочки, а точка сопряжения ее со средней параболой в радиальном направлении отстоит от точки сопряжения ее с торцом бочки на 5-10 мм.

3. Применение нового метода моделирования профилировок валков для совершенствования технологии листовых станов

3.1. Применение новой методики расчета профилировок валков для улучшения качества холоднокатаных полос

Некоторые результаты разработанной методики расчета профилировок валков были использованы для совершенствования технологического режима непрерывного пятиклетевого стана холодной прокатки 1700 ОАО «Северсталь» [44, 45]. Цель исследования состояла в устранении на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлых прикромочных полос с шероховатостью поверхности $R_a = 2,2-3,0$ мкм, превышающей допустимое значение $R_{a_{\max}} = 1,9$ мкм.

Стремление сократить количество сварных швов при изготовлении кузова автомобиля вызвало увеличение спроса на листы шириной свыше 1400 мм.

Чтобы удовлетворить возросшую потребность автопроизводителей в таких листах, на 5^{ти}-клетевом стане 1700 Череповецкого металлургического комбината (ЧерМК) ОАО «Северсталь» увеличили объем производства наиболее широких полос паспортного сортамента – шириной 1400-1550 мм, а также освоили технологию прокатки полос, имеющих ширину от 1560 до 1600 мм, не предусмотренную паспортной характеристикой стана.

Поскольку в сортаменте 5^{ти}-клетевого стана 1700, как и большинства других широкополосных станов, предусмотрена возможность прокатки полос всего диапазона ширин – от минимальной (900-1000 мм) до максимальной (1500-1550 мм), конструкцией стана предусмотрено выполнение бочки опорных валков длиной $L_{оп} = 1600$ мм, т.е. на 100 мм меньше длины бочки рабочих валков.

Однако и при таком соотношении длин бочек рабочего и опорного валков прокатка полос минимальной ширины вызывала затруднения: из-за большого упругого сплющивания в средней части бочек рабочих валков их нерабочие торцевые участки нередко начинали контактировать друг с другом, что приводило к повышенному разогреву и искажениям теплового профиля, вызывавшим появление волнистости в прикромочных участках полос. Исправление волнистости воздействием противоизгиба рабочих валков оказывалось малоэффективным при ширине полос 900-1100 мм, т.к. края бочек опорных валков препятствовали удалению от полосы торцовых участков бочек рабочих валков. Из-за этих особенностей взаимодействия рабочих валков с полосой и с опорными валками в конце 70^х – начале 80^х годов на краях бочек опорных валков длиной по 100-120 мм стали выполнять конические скосы. В частности, на 5^{ти} клетевом стане 1700 длины участков со скосами бочек опорных валков составляют 100 мм.

Выполнение скосов обеспечило возможность качественной прокатки полос минимальной ширины, но привело к тому, что при прокатке полос максимальной ширины – свыше 1400 мм – на поверхности их прикромочных участков, находящихся за пределами зоны плотного контакта рабочих и опорных валков, появились светлые полосы шириной до 100 мм (рис. 3.1).

Для листов, используемых в качестве наружных элементов кузова легкового автомобиля, такие полосы являются недопустимым дефектом. Величины нормируемого показателя шероховатости R_a на участках светлых полос оказались равными 2,2-3,0 мкм, а на остальной поверхности $R_a = 1,1-1,5$ мкм; в то время, как предельно допустимая её величина, установленная требованиями автопроизводителей, равна: $R_{a_{\max}} = 1,9$ 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.

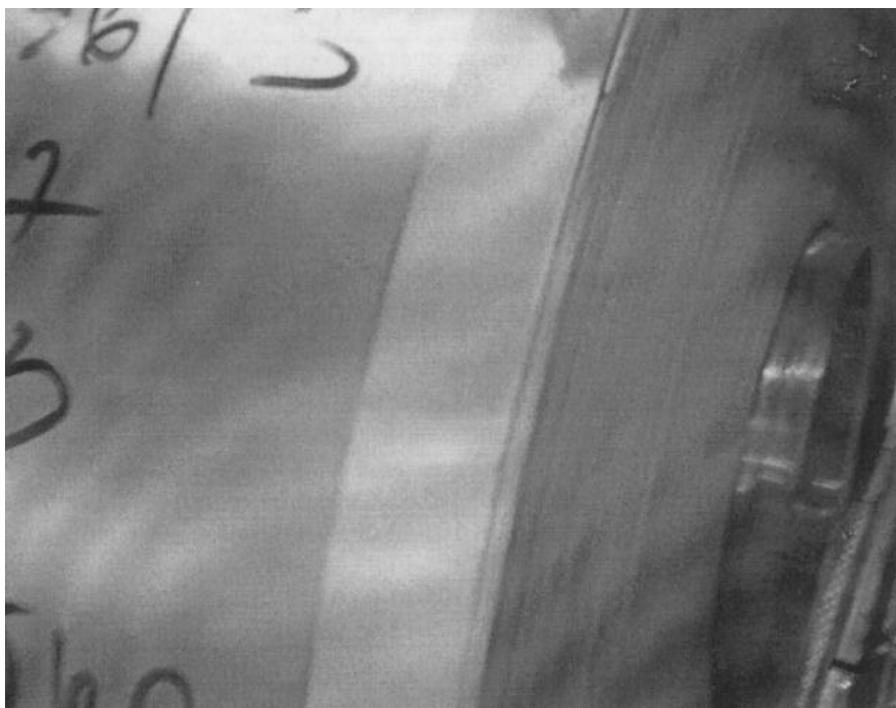


Рис. 3.1. Фотография наружной поверхности рулона холоднокатаной полосы из стали марки 08Ю толщиной 0,7 мм шириной 1560 мм

Для определения возможности практической реализации указанного мероприятия необходимо было установить, можно ли в рабочей клетки с выпуклыми опорными валками, не имеющими скосов, качественно прокатать самые узкие и тонкие полосы сортамента стана (шириной 990-1015 мм, толщиной 0,28 мм) без соприкосновения краев бочек верхнего и нижнего рабочих валков, исключив при этом дефекты неплоскостности и обеспечив требуемую поперечную разнотолщинность.

Для ответа на этот вопрос было проведено компьютерное моделирование упругих деформаций и профилировок рабочих и опорных валков 5^й клетки при прокатке полос указанного профилеразмера с использованием изложенной в главе 2 новой методики расчета профилировок валков.

Значение усилия прокатки взяли из реального режима прокатки, параметры которого представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Режим прокатки полосы 0,28x1015 мм, сталь 08пс

Клеть №	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	N_{i-1} , кН	N_i , кН	μ_i	P_i , МН
1	3,29	1,820	1,170	124,8	165,1	0,048	10,45
2	5,78	1,170	0,727	165,1	113,8	0,0223	7,68
3	9,26	0,727	0,452	113,8	79,8	0,0185	6,47
4	14,46	0,452	0,291	79,8	54,2	0,0151	6,43
5	14,73	0,291	0,280	54,2	9,9	0,028	11,3

v_i – скорость прокатки; h_{i-1} , h_i – толщина полосы на входе в клеть и выходе из неё; N_{i-1} , N_i – натяжения полосы перед и за клетью; μ_i – коэффициент трения; P_i – усилие прокатки.

Шлифовочную выпуклость опорного вала (разность диаметров в середине и у края бочки) варьировали в реальном диапазоне, предварительно установленном с учетом практического опыта: $\Delta D_{ш.оп} = 0,3-0,6$ мм. Шлифовочные выпуклости рабочих валков $\Delta D_{ш.р}$ варьировали в диапазоне от -0,1 до 0,5 мм. Согласно приведенной выше методике, с помощью САЕ-системы для каждого варианта определяли кривую упругой деформации, которую геометрически суммировали с кривой теплового профиля для определения контура поперечного профиля полосы и его поперечную разнотолщинность, исходя из требования, чтобы при прокатке одновременно выполнялись два условия:

1. Исключение контакта краев бочек верхнего и нижнего рабочих валков. Это условие состоит в том, что разность расстояний от оси прокатки до середины h_c и до края бочки $h_{кр.б.}$ профиля рабочего вала меньше половины заданной толщины полосы:

$$\frac{h_c}{2} - \frac{h_{кр.б.}}{2} < \frac{h_{зад}}{2}. \quad (3.1)$$

2. Поперечная разнотолщинность полосы не должна превышать допускаемого значения, которое для листов автомобильного сортамента

составляет 2 % от номинальной толщины:

$$\delta h_{\text{поп}} \leq 0,02h_{\text{зад}}. \quad (3.2)$$

В табл. 3.2 приведены результаты проверки условий $\frac{h_c}{2} - \frac{h_{\text{кр.б.}}}{2} < 0,14$ мм и $\delta h_{\text{поп}} \leq 0,056$ мм в пятой клетки режима прокатки табл. 3.1.

Таблица 3.2

Условия (3.1) и (3.2) при $\Delta D_{\text{ш.оп}} = 0,6$ мм и $\Delta D_{\text{ш.р}} = 0,1-0,4$ мм для пятой клетки режима прокатки табл. 3.1

Проверяемые условия	$\Delta D_{\text{ш.р}}$, мм					
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,35	0,4
$\frac{h_c}{2} - \frac{h_{\text{кр.б.}}}{2}$, мм	0,13461	0,12496	0,09904	0,05109	0,02415	-0,00172
$\delta h_{\text{поп}}$, мм	0,06254	0,05157	0,04106	0,02027	0,00917	0,00471

Как видно из табл. 3.2 условие (3.1) выполняется при $\Delta D_{\text{ш.р}} = 0,1$ мм, а условие (3.2) – при $\Delta D_{\text{ш.р}} = 0,4$ мм. Аналогично были проверены условия для всех диапазонов значений толщин и ширин полос, прокатываемых на стане, и определены шлифовочные выпуклости рабочих валков при разных выпуклостях опорных.

Рассчитанные по условиям (3.1), (3.2) шлифовочные выпуклости рабочих валков корректировали при прокатке, чтобы исключить появление неплоскостности на полосе, т.к. условие (3.2) не учитывает поперечную разнотолщинность горячекатаного подката.

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, $\Delta D_{\text{ш.оп}} = 0,6$ мм, а шлифовочные выпуклости рабочих валков выполняли в соответствии с табл. 3.3.

Таблица 3.3

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. 3.3, 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 клетки стана 1700 в течение 3^х месяцев – с ноября 2010 г. по январь 2011 г. За этот период в клетки отработали 4 межперевалочные кампании опорных валков. Нарботка 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 прикромочных 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 клетки пятиклетевого стана 1700 и измененные выпуклости (вогнутости) рабочих валков были приняты к постоянному использованию в производстве.

3.2. Применение новой методики для расчета профилировок рабочих валков чистовой группы стана 2000

Еще одним результатом разработанной методики стало внедрение на стане горячей прокатки 2000 ОАО «Северсталь» скорректированных вогнутых профилировок валков чистовой 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 [74, 75].

Значения профилировочной вогнутости рабочих валков чистовых клеток 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.

В результате обработки базы данных АСУТП стана 2000 и измерений температуры и теплового профиля валков его чистовой группы были установлены наиболее характерные значения сил прокатки в каждой клетки и

усредненная по всем клетям величина тепловой выпуклости рабочих валков на длине бочки: $\Delta D_{т.р.} = 0,5$ мм (тепловая выпуклость на ширине полосы $\Delta D_{т.р.б} \approx 0,3$ мм).

Вогнутости рабочих валков рассчитывали с использованием новой методики расчета профилировок и выполнением условия:

$$\delta h_{\text{вып.подк}} \leq 1\% \text{ от } h_{c_i}, \quad (3.3)$$

где $\delta h_{\text{вып.подк}}$ – выпуклость поперечного профиля полос после i -ой клетки; h_{c_i} – толщина в середине ширины полосы на выходе из i -ой клетки. Величина $\delta h_{\text{вып.подк}}$ должна быть всегда положительной, чтобы в процессе горячей прокатки полоса не потеряла осевую устойчивость, и может быть определена по формуле

$$\delta h_{\text{вып.подк}} = h_c - \frac{h_{\text{лев}} + h_{\text{прав}}}{2}, \quad (3.4)$$

где h_c , $h_{\text{лев}}$, $h_{\text{прав}}$ – толщина подката, соответственно в середине, у левой и у правой боковых кромок.

Для каждой клетки чистовой группы стана 2000 была создана трехмерная геометрическая модель валкового узла с соответствующими значениями профилировок валков. В САЕ-системе для каждой клетки определяли значения упругой деформации в середине валков u_c и в сечении, соответствующем кромке полосы u_b , далее, с учетом теплового профиля валков, определяли выпуклость поперечного профиля полос после i -ой клетки, проверяя условие (3.3). В качестве примера в табл. 3.4 приведены результаты расчета выпуклости поперечного профиля полос в клетях №6 и №12 при разных значениях вогнутости рабочих валков при ширине полосы $b = 1300$ мм. Как видно из табл. 3.4, условие (3.3) выполняется при $\Delta D_{ш.р} = -0,45$ мм в клетях №6 и при $\Delta D_{ш.р} = -0,13$ мм в клетях №12. Аналогично были исследованы все толщины и ширины полос, прокатываемых на стане в семи клетях чистовой группы, и определены шлифовочные вогнутости рабочих валков.

Таблица 3.4

Выпуклость поперечного профиля полос в клетях №6 и №12 при разных значениях вогнутости рабочих валков ($b = 1300$ мм)

Вогнутость рабочего валка, мм	P , МН	y_c , мм	y_b , мм	$\delta h_{\text{вып. подк}}$, мм	$\delta h_{\text{вып. подк}}$, %
Клеть № 6; $h_c = 20$ мм					
-0,5	25	2,33	1,5328	0,4972	2,486
-0,48		2,326	1,6332	0,3928	1,964
-0,45		2,3228	1,8282	0,1946	0,973
Клеть №12; $h_c = 2$ мм					
-0,15	14	0,7954	0,4006	0,0948	4,74
-0,14		0,8038	0,4724	0,0314	1,57
-0,13		0,8242	0,5114	0,0128	0,64

Значения профилировок рабочих валков чистовой группы стана 2000, нормированные существующей технологической инструкцией и рекомендуемые значения откорректированных вогнутостей рабочих валков, приведены в табл. 3.5 (все профилировки вогнутые).

Таблица 3.5

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

№ клетки	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. 3.4 и 3.5 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 чистовой группе клетей стана 2000 [74, 75], позволили снизить значение поперечной разнотолщинности горячекатаных полос толщиной 2,0-6,0 мм, из которого 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.

Учитывая изложенное, представленную методику определения профилировок валков, основанную на методе конечных элементов, рекомендуется использовать в конструкторских и технологических расчетах для повышения точности холоднокатаных и горячекатаных полос.

Выводы по главе 3

1. С использованием новой методики разработаны, успешно испытаны и приняты в производство скорректированные профилировки опорных и рабочих валков 5^й клетки пятиклетевого стана холодной прокатки с целью устранения на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлых прикромочных полос с вненормативной шероховатостью. Внедрение результатов испытаний позволило полностью устранить вненормативную шероховатость с показателем $R_a > 1,9$ мкм на поверхности прикромочных участков полос шириной более 1400 без увеличения отсортировки металла по неплоскостности и другим дефектам.

2. Рассчитаны с применением новой методики и внедрены на стане горячей прокатки 2000 скорректированные вогнутые профилировки рабочих валков чистовой группы, обеспечивающие выполнение жестких требований к поперечному профилю горячекатаного подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента. Внедрение результатов работы позволило снизить значения поперечной разнотолщинности горячекатаных полос толщиной 2,0-6,0 мм с 0,04-0,1 мм до 0,02-0,06 мм без ухудшения их плоскостности.

4. Моделирование и исследование упругих деформаций шестивалковых клеток

4.1. Техническая характеристика шестивалковых клеток и проблема оценки областей их эффективного использования

В последние десятилетия XX века в мировом производстве широкополосной холоднокатаной стали, наряду с клетями "кварто", начали применять шестивалковые клетки, в которых между опорным и рабочим валками установлен промежуточный валок.

На рис. 4.1 схематично представлен общий вид шестивалковой клетки, состоящей из узла станин 1, в окнах которых размещены подушки валкового узла, включающего опорные валки 2, промежуточные валки 3 и рабочие валки 4. В подушках валков и корпусах, установленных в окне каждой

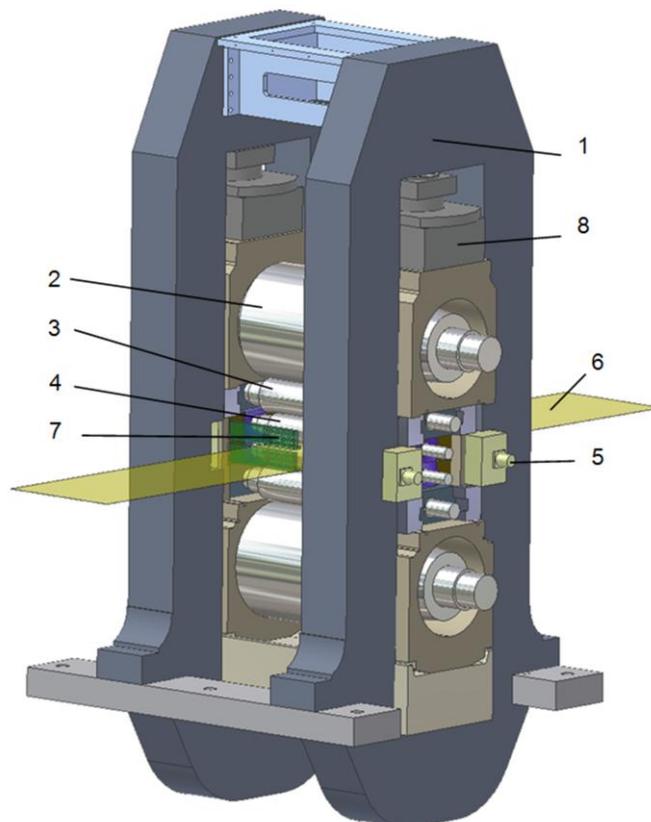


Рис. 4.1. Общий вид шестивалковой клетки

станины, смонтированы механизмы уравнивания и изгиба валков (на рис. 4.1 не показаны), к станинам также крепятся механизмы 5, с помощью которых осуществляют встречное осевое перемещение рабочих и/или промежуточных валков для регулирования профиля и плоскостности прокатываемой полосы 6. Между станинами расположены коллекторы 7 многозонного охлаждения валков. С подушками опорных валков контактируют гидравлические нажимные устройства (ГНУ) 8.

Направления и величины сил и моментов в шестивалковой клетке зависят от конструктивного исполнения валкового узла, один из вариантов которого показан на рис. 4.2. Подушки 1 и 2 рабочих валков 3 и подушки 4, 5 опорных валков 6 расположены таким образом, чтобы их вертикальные осевые плоскости 7, 8 были смещены относительно вертикальной осевой плоскости 9 промежуточных валков 10, установленных в подушках 11 и 12, на расстояния e_p и $e_{оп}$. Цель этого смещения – обеспечить устойчивое положение в клетке рабочих и промежуточных валков, исключив тем самым один из факторов вибрации клетки и колебаний межвалкового зазора. Величины e_p и $e_{оп}$ можно регулировать разными способами, например, e_p – с помощью системы горизонтальной стабилизации рабочих валков, включающей боковые опорные ролики 13 и гидроцилиндры 14, смонтированные в корпусах 15, а $e_{оп}$ – меняя толщину сменных планок 16, закрепляемых на вертикальных плоскостях окна станины 17.

Подушки рабочих валков контактируют с корпусами 15, закрепленными на корпусах 18 в окне станины 17. Подушки всех валков контактируют со своими опорными плоскостями по ходовой посадке с возможностью свободного перемещения в вертикальном направлении, в результате на подшипники и шейки валков со стороны вертикальных опорных плоскостей окна станины действуют только горизонтальные усилия, при этом шейки рабочих и промежуточных валков свободны от вертикальных нагрузок, возникающих от усилия прокатки, а на шейки опорных валков, как и в клетке

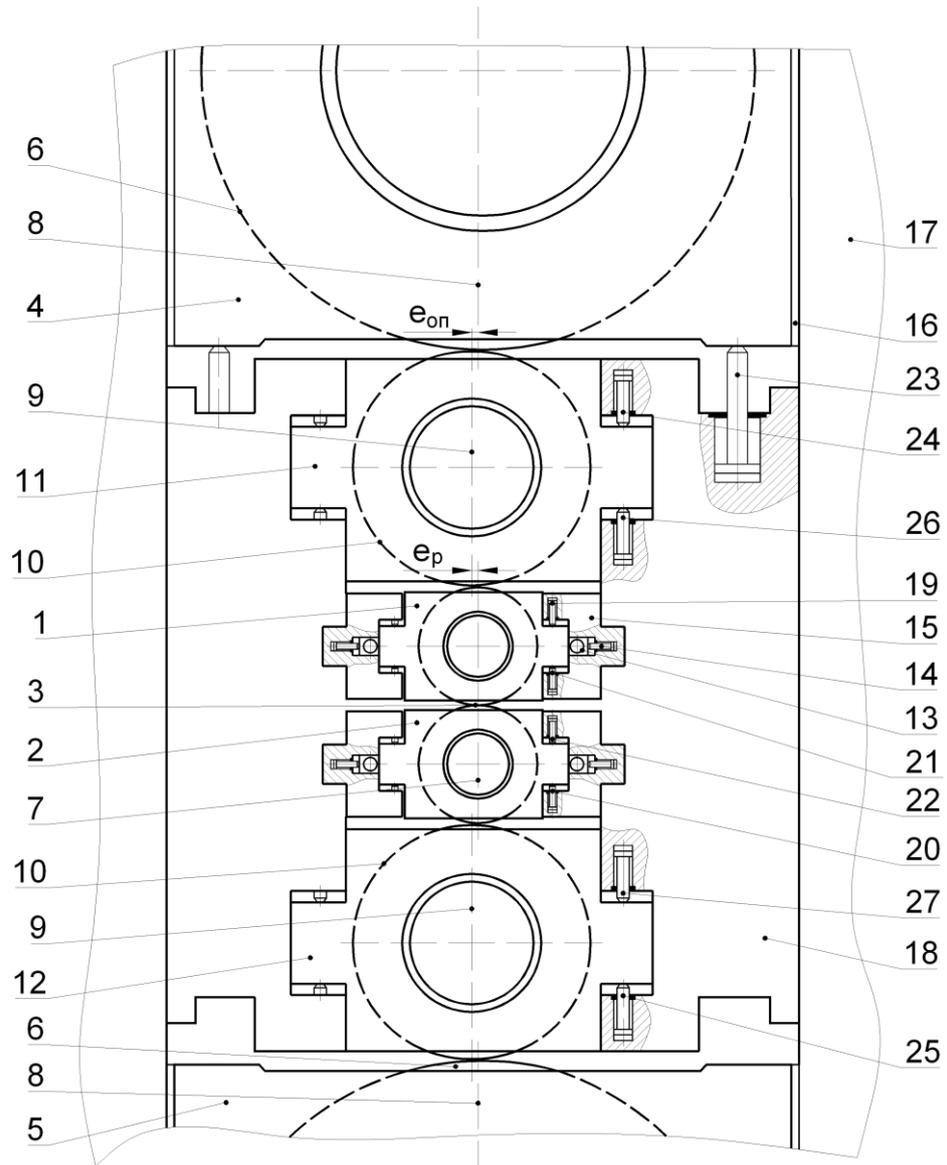


Рис. 4.2. Конструктивное исполнение валкового узла шестивалковой клетки

«кварто», действуют вертикальные усилия со стороны ГНУ, являющиеся реакциями на усилие прокатки.

В корпусах *15* установлены гидроцилиндры дополнительного изгиба рабочих валков *19*, *20* и противоизгиба рабочих валков *21*, *22*, при этом цилиндры *21* выполняют еще одну роль – уравнивание верхнего рабочего валка. В корпусах *18* смонтированы гидроцилиндры *23* уравнивания верхнего опорного валка, гидроцилиндры дополнительного изгиба промежуточных валков *24*, *25* и противоизгиба

промежуточных валков 26, 27, при этом цилиндры 26 имеют дополнительное назначение – они уравнивают верхний промежуточный валок.

Однозначная точка зрения на диапазоны профилеразмеров и марок стали тонких полос, при которых целесообразно использовать шестивалковые клетки, если намечается реконструкция действующего широкополосного стана холодной прокатки или проектирование нового стана в технической литературе отсутствует, так как шестивалковая клетка, по сравнению с четырехвалковой («кварто»), с теми же диаметрами рабочих и опорных валков имеет бóльшие габариты, требует бóльших капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Основное преимущество шестивалковых клеток перед четырехвалковыми клетками состоит в возможности уменьшить диаметр рабочих валков до 200-250 мм и оснастить гидроизгибом как рабочие, так и промежуточные валки. Это позволяет выкатывать особо тонкие стальные полосы толщиной 0,1-0,2 мм и более продуктивно воздействовать на толщину в поперечном направлении, гарантируя лучшее качество регулирования плоскостности полосы.

В работах [46, 47] представлены результаты выполненного работниками фирмы Siemens VAI сопоставительного анализа жесткости четырех- и шестивалковых клеток. Однако в этих работах отсутствует математический аппарат, с помощью которого выполнялись расчеты упругих деформаций. Вдобавок, авторы [46, 47] сравнивали четырех- и шестивалковые клетки с рабочими валками, имеющими диаметры бочек 420-470 мм. Как показано в работах [55-58], использовать шестивалковую клетку с такими диаметрами рабочих валков нецелесообразно: они, по сравнению с клетками, имеющими диаметр рабочих валков 200-250 мм, лишены важных преимуществ – возможности уменьшить усилие прокатки и производить полосы минимальных толщин, кроме того, они имеют повышенную металлоемкость.

Исходя из изложенного, задача разработки математического аппарата, который можно использовать для сопоставления преимуществ и недостатков

шестивалковых и четырехвалковых клетей при прокатке полос разных марок сталей и диапазонов профилированных размеров, является актуальной. Очевидно, этот математический аппарат должен обеспечить возможность сопоставить эффективность регулирования в шестивалковой и четырехвалковой клетях основных показателей точности полос: продольной, поперечной разнотолщинности и плоскостности. Для этого необходимо иметь методы расчета упругих деформаций валковых систем рабочих клетей указанных типов. В отличие от четырехвалковых клетей, применительно к шестивалковым клетям до начала нашей работы такие методы в технической литературе отсутствовали.

Учитывая это, мы приняли решение разработать сначала аналитический метод расчета упругих деформаций шестивалковой клетки, руководствуясь классическими положениями теорий прокатки и упругости, а затем проверить его достоверность методом конечных элементов.

4.2. Разработка аналитического метода расчета упругих деформаций шестивалковой клетки

Для разработки аналитического метода были приняты следующие допущения:

1. Под действием усилия прокатки опорный валок прогибается как балка на двух опорах, а рабочий и промежуточный валки прогибаются как балки на упругом основании.

2. Поскольку рассматривается задача об определении области эффективного использования шестивалковых клетей, без расчета конкретных значений поперечного профиля полосы, для упрощения решения задачи можно принять цилиндрическую профилировку валков и не учитывать неравномерность распределения контактных напряжений по ширине полосы и длине бочек валков.

При указанных допущениях общая упругая деформация валковой системы шестивалковой клетки в середине бочки валков определяет продольную разнотолщинность полосы и складывается (рис. 4.3) 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 вала y_a относительно линий действия реакций опор [76-78]:

$$y_c = 2(\delta_{п-р} + \delta_1 + \delta_2 + y_a). \quad (4.1)$$

В предложенной расчетной схеме учтено, что длина бочки опорного вала может быть меньше длины бочек промежуточного и рабочего валков, а также предусмотрена возможность выполнения концевых скосов на бочке опорного вала.

Совместное упругое сжатие валков (рабочего – промежуточного и промежуточного – опорного) определяется с помощью формулы Б. С. Ковальского [7, 11] для расчета деформации сжатия (сближения осей) двух соприкасающихся цилиндров:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{2q_1}{\pi} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \left(\ln \frac{D_p}{b_1} + 0,407 \right) + \frac{1 - \nu_{пр}^2}{E_{пр}} \left(\ln \frac{D_{пр}}{b_1} + 0,407 \right) \right]; \\ \delta_2 &= \frac{2q_2}{\pi} \left[\frac{1 - \nu_{пр}^2}{E_{пр}} \left(\ln \frac{D_{пр}}{b_2} + 0,407 \right) + \frac{1 - \nu_{оп}^2}{E_{оп}} \left(\ln \frac{D_{оп}}{b_2} + 0,407 \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.2)$$

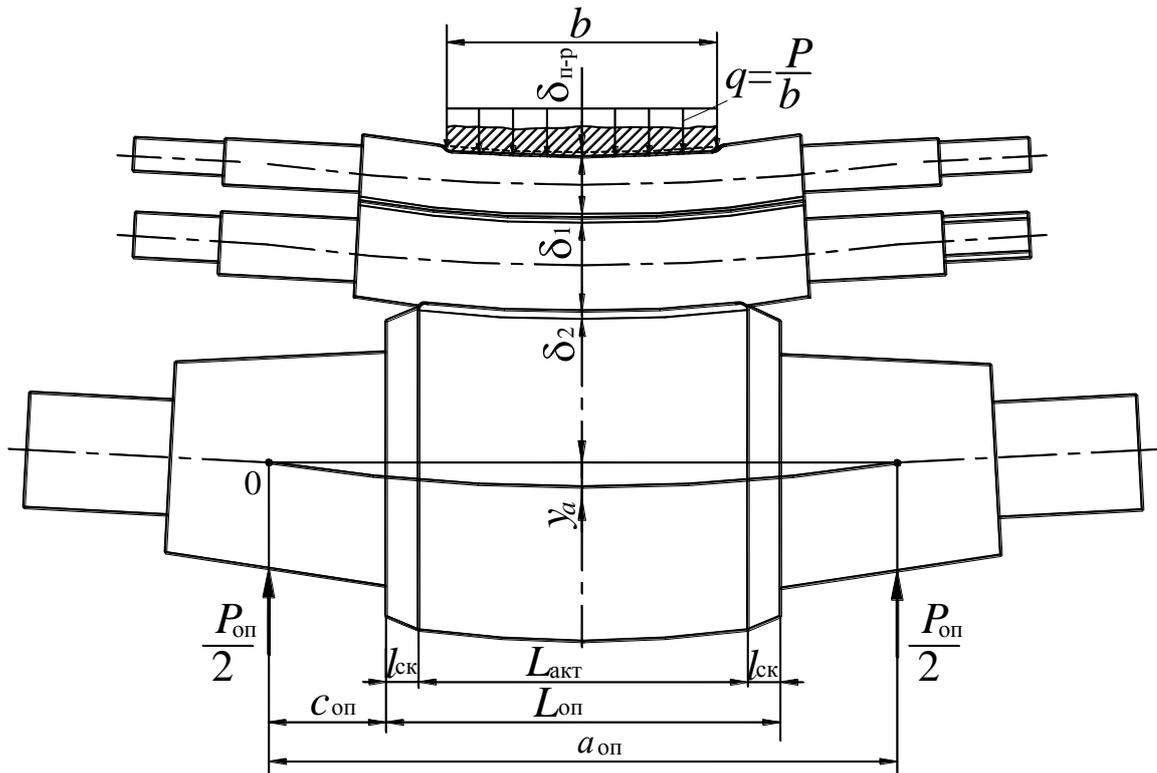


Рис. 4.3. Расчетная схема для определения упругой деформации валкового узла шестивалковой клетки в середине бочки

Точный расчет неравномерного упругого сжатия рабочего валка в контакте с полосой можно выполнить лишь на основе совместного анализа упругих деформаций полосы и валков [79]:

$$\delta_{п-р} = \frac{\left(8p_{ср} \frac{D_p}{2} \left[\frac{1-\nu_p^2}{\pi E_p} + \frac{1-\nu_{п}^2}{\pi E_{п}} \right] \right)^2}{D_p}, \quad (4.3)$$

где $p_{ср}$ – среднее контактное напряжение, определяемое с учетом упругого сжатия валков и прокатываемой полосы по формулам, основанным на упругопластической модели очага деформации.

Для приближенного расчета можно использовать другие выражения, например решение Б.С. Ковальского [4, 8] для случая цилиндра и плоскости:

$$\delta_{п-р} = \frac{2P(1-\nu_p^2)}{\pi b E_p} \left(\ln \frac{D_p}{b_{п-р}} + 0,407 \right). \quad (4.4)$$

В формулах (4.2)-(4.4) приняты следующие обозначения: P – усилие прокатки; q_1, q_2 – погонные нагрузки в межвалковых контактах; b – ширина полосы; $\nu_p, \nu_{пр}, \nu_{оп}, \nu_{п}$ – коэффициенты Пуассона материала рабочих, промежуточных, опорных валков и полосы; $E_p, E_{пр}, E_{оп}, E_{п}$ – модули упругости материала валков и полосы; $D_p, D_{пр}, D_{оп}$ – диаметры бочек валков; $b_1, b_2, b_{п-р}$ – полуширина площадок смятия между рабочим – промежуточным и промежуточным – опорным валками и между рабочим валком и полосой, вычисляемые по формуле Герца.

Для сравнения областей эффективного использования четырехвалковых и шестивалковых клетей при одинаковых диаметрах бочек рабочих валков удобнее пользоваться формулой (4.4), так как не всегда есть возможность точно определить $\rho_{ср}$, например, при исследовании влияния колебаний усилия прокатки.

Прогиб середины бочки опорного валка относительно линий опор, равный сумме прогибов, возникающих от действия изгибающих моментов y'_a и поперечных сил y''_a , определяли с помощью теоремы Кастильяно на участке от 0 до $a_{оп}/2$ схемы рис. 4.3.

В табл. 4.1 приведены выражения для определения прогиба опорного валка в середине и по кромке полосы. Прогиб опорного валка по кромке полосы, необходимый для исследования поперечной жесткости клетки, определяли с помощью теоремы Кастильяно на участке от 0 до $(a_{оп} - b)/2$ схемы рис. 4.3.

Выражения прогиба опорного вала в середине бочки и в сечении, соответствующем кромке полосы

Прогиб в середине бочки опорного вала	Прогиб опорного вала по кромке полосы
1. Суммарный прогиб опорного вала	
$y_a = y'_a + y''_a$	$y_b = y'_b + y''_b$
2. Прогиб от действия изгибающих моментов	
$y'_a = \frac{P_{оп}}{12E_{оп}J_{б_{оп}}} \left[\frac{1}{8}a_{оп}^3 + c_{оп}^3 \left(\frac{J_{б_{оп}}}{J_{ш_{оп}}} - 1 \right) - \frac{1}{4L_{акт}} \left(\frac{3}{16}a_{оп}^4 - n_{оп}^4 - a_{оп}^2 n_{оп} \left(a_{оп} + \frac{3}{2}n_{оп} \right) \right) \right]$	$y'_b = \frac{P_{оп}(a_{оп} + b)}{12a_{оп}E_{оп}J_{б_{оп}}} \left[m_{оп}^3 + c_{оп}^3 \left(\frac{J_{б_{оп}}}{J_{ш_{оп}}} - 1 \right) - \frac{1}{4L_{акт}} (3m_{оп}^4 - n_{оп}^4 - 2m_{оп}^2 n_{оп} (4m_{оп} + 3n_{оп})) \right]$
где $m_{оп} = \frac{a_{оп} - b}{2}$; $n_{оп} = c_{оп} + l_{ск}$	
3. Прогиб от действия поперечных сил	
$y''_a = \frac{P_{оп}}{2\pi G_{оп} D_{оп}^2} \left[a_{оп} + 2c_{оп} \left(\frac{D_{оп}^2}{d_{ш_{оп}}^2} - 1 \right) - \frac{1}{L_{акт}} (a_{оп} - 2n_{оп})^2 \right]$	$y''_b = \frac{P_{оп}(a_{оп} + b)}{\pi a_{оп} G_{оп} D_{оп}^2} \left[\left(m_{оп} + c_{оп} \left(\frac{D_{оп}^2}{d_{ш_{оп}}^2} - 1 \right) \right) - \frac{1}{L_{акт}} (m_{оп} - n_{оп})^2 \right]$
где $m_{оп} = \frac{a_{оп} - b}{2}$; $n_{оп} = c_{оп} + l_{ск}$	

В выражениях табл. 4.1 приняты обозначения: $P_{оп}$ – усилие, действующее на опорный валок ($P_{оп} \approx P$); $E_{оп}$ и $G_{оп}$ – модули упругости и сдвига материала опорного вала; $J_{б_{оп}} = \frac{\pi D_{оп}^4}{64}$ – момент инерции сечения бочки опорного вала; $J_{ш_{оп}} = \frac{\pi d_{ш_{оп}}^4}{64}$ – момент инерции сечения его шейки; $c_{оп}$ – расстояние от нажимного устройства до края бочки опорного вала; $d_{ш_{оп}}$ – диаметр шейки опорного вала.

При теоретическом определении жесткости клетки рассчитывают величину упругой деформации клетки как сумму упругих деформаций ее отдельных элементов [79]:

$$y_{кл} = y_c + y_{ст} + y_{дет}, \quad (4.5)$$

где y_c , $y_{ст}$, $y_{дет}$ – упругая деформация соответственно валкового узла, станины, остальных деталей клетки.

Общая упругая деформация станины закрытого типа рабочей клетки $y_{ст}$ определяется по формулам А. И. Целикова [11]. Исходя из опыта эксплуатации четырехвалковых клетей [79], аналогично для шестивалковой клетки можно принять ширину окна станины $B_{ок} = (1,1 \div 1,2)D_{оп}$, а высоту $H_{ок} = (3,0 \div 3,2)(D_p + D_{пр} + D_{оп})$.

Деформация всех остальных деталей клетки $y_{дет}$, по данным многочисленных исследований [11, 40, 41, 79], не превышает 35% общей деформации клетки. При этом до 15% приходится на долю нажимных устройств и около 20% приходится на остальные узлы, включая подушки, подшипники, прокладки, подпятники и т. п. Поэтому деформацию остальных деталей $y_{дет}$ можно учитывать числовым коэффициентом, рассчитанным, исходя из доли остальных деталей в общей жесткости клетки. Формула (4.5) примет вид

$$y_{кл} = a_{кл}(y_c + y_{ст}), \quad (4.6)$$

где $a_{кл}$ – величина, зависящая от конструкции клетки и для листовых станков находящаяся, по данным [79], в пределах $a_{кл} = 1,5 \div 1,7$.

После нахождения упругих деформаций всех деталей и узлов клетки можно определить модуль жесткости клетки по формуле, МН/мм

$$M_{кл} = \frac{P}{y_{кл}}. \quad (4.7)$$

Расчет упругих деформаций, воздействующих на поперечную разнотолщинность полосы, рассматривался с учетом принудительного гидроизгиба валков. В шестивалковой клетки, помимо рабочих валков, устройствами дополнительного изгиба и противоизгиба можно оснащать промежуточные валки.

Поперечную разнотолщинность полосы в шестивалковой клетке, без учета профилировки и износа валков по ширине полосы, можно определить по формуле:

$$\delta h = y_c - y_{кр} - 2y_{Q_p^{np}} - 2y_{Q_{np}^{np}} + 2y_{Q_p^{доп}} + 2y_{Q_{np}^{доп}} - 2\delta_1^{Q_p^{np}} - 2\delta_2^{Q_{np}^{np}} + 2\delta_1^{Q_p^{доп}} + 2\delta_2^{Q_{np}^{доп}}, \quad (4.8)$$

где y_c , $y_{кр}$ – деформации валковой системы посередине и по кромке полосы; $y_{Q_p^{np}}$, $y_{Q_{np}^{np}}$ – прогибы рабочего и промежуточного валков от усилий противоизгиба в сечении, соответствующем кромке полосы; $y_{Q_p^{доп}}$, $y_{Q_{np}^{доп}}$ – прогибы рабочего и промежуточного валков от дополнительного изгиба в сечении по кромке полосы. При противоизгибе рабочего и промежуточного валков: $\delta_1^{Q_p^{np}}$, $\delta_2^{Q_{np}^{np}}$ – сплющивания соответственно между рабочим и промежуточным валками и между промежуточным и опорным валками при противоизгибе рабочего и промежуточного валков; $\delta_1^{Q_p^{доп}}$, $\delta_2^{Q_{np}^{доп}}$ – сплющивания соответственно между рабочим валком и полосой и между рабочим и промежуточным валками при дополнительном изгибе рабочего и промежуточного валков.

Деформация валковой системы по кромке полосы $y_{кр}$ определяется аналогично y_c :

$$y_{кр} = 2(\delta_{п-р} + \delta_1 + \delta_2 + y_b), \quad (4.9)$$

где y_b – прогиб опорного валка в сечении, соответствующем кромке полосы, определяется по формулам табл. 4.1.

Для определения прогиба валков от усилий гидроизгиба $y_{Q_p^{np}}$, $y_{Q_{np}^{np}}$, $y_{Q_p^{доп}}$, $y_{Q_{np}^{доп}}$ помимо допущений, принятых при создании модели упругих деформаций валковой системы, приняли, что нагрузка на валки относительно их середины симметрична, гидроизгиб валков не влияет на прогиб опорного валка.

Допущение, что нагрузка на валки относительно их середины симметрична, позволяет рассмотреть только половину валков с заделкой посередине. Нагрузочные схемы валков показаны на рис. 4.4: *a* – противоизгиб промежуточных и рабочих валков; *б* – дополнительный изгиб промежуточных и рабочих валков.

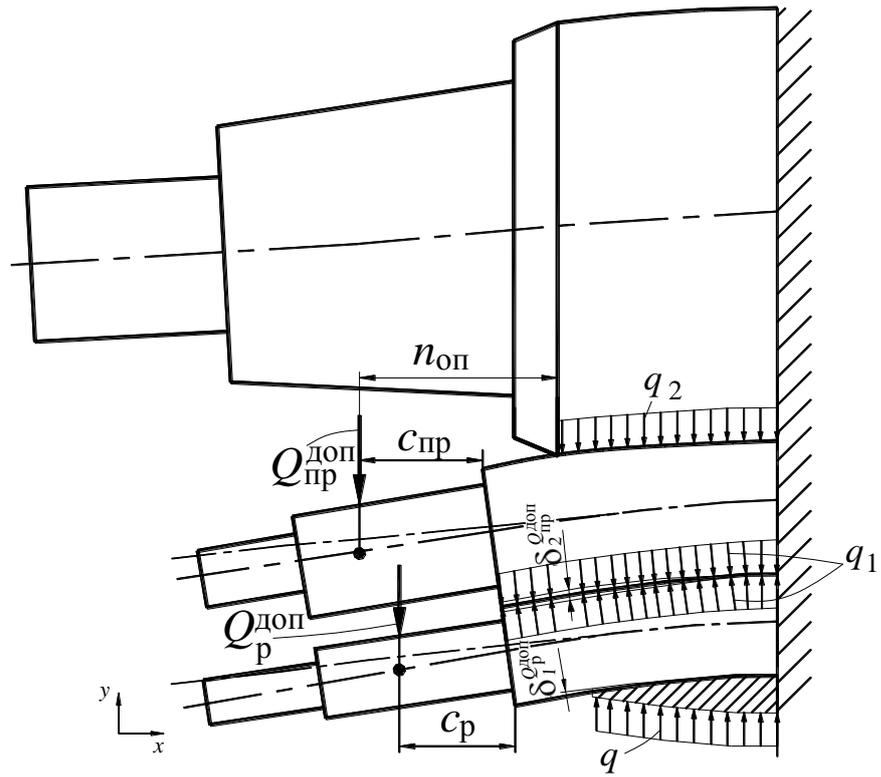
Силы противоизгиба рабочих $Q_p^{пр}$ и промежуточных $Q_{пр}^{пр}$ валков, направленные как показано на рис. 4.4, *a*, являются положительными, а силы дополнительного изгиба рабочих $Q_p^{доп}$ и промежуточных $Q_{пр}^{доп}$ валков – отрицательными (рис. 4.4, *б*).

Из показанных схем рабочий валок может рассматриваться как балка с защемленным концом, нагруженная сосредоточенной силой $Q_p^{пр}$ или $Q_p^{доп}$ и равномерно распределенными нагрузками $q_1 = P_{пр} / L_p$ и $q = P / b$ (рис. 4.5, *a*), а промежуточный валок – как балка с защемленным концом, нагруженная сосредоточенной силой $Q_{пр}^{пр}$ или $Q_{пр}^{доп}$ и равномерно распределенными нагрузками $q_1 = P_{пр} / L_{пр}$ и $q_2 = P_{оп} / (L_{оп} - 2l_{ск})$ (рис. 4.5, *б*), здесь $P_{пр}$ – межвалковое усилие, действующее между рабочим и промежуточным валками ($P_{пр} \approx P$). Начало отсчета абсциссы x соответствует приложению сил $Q_p^{пр}$, $Q_p^{доп}$, $Q_{пр}^{пр}$ или $Q_{пр}^{доп}$.

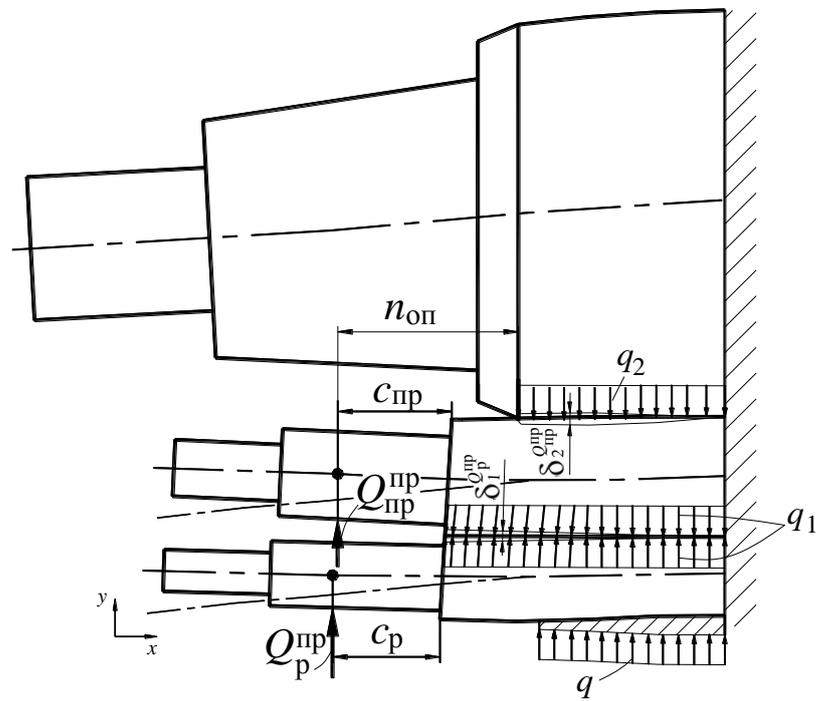
Прогибы промежуточного и рабочего валков от усилий гидроизгиба определяли по теореме Кастильяно. Из курса сопротивления материалов [80-82] известно, что прогибы балок, согласно теореме Кастильяно, можно определить из следующих уравнений:

$$y' = \int \frac{M(x)dx}{EJ} \frac{\partial M(x)}{\partial F}; \quad y'' = \int \frac{Q(x)dx}{GF} \frac{\partial Q(x)}{\partial F}, \quad (4.10)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент; $Q(x)$ – перерезывающая сила; F – фиктивная сосредоточенная нагрузка в месте определения прогиба.

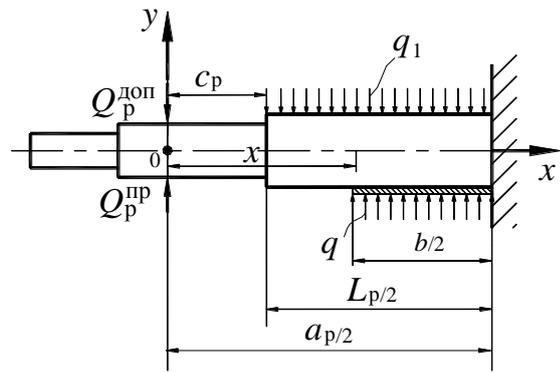


а

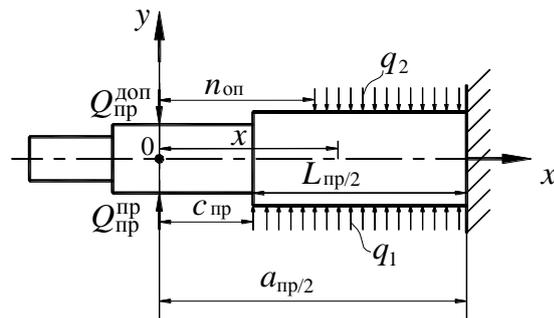


б

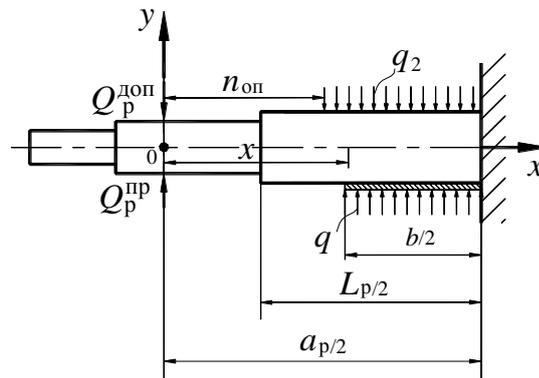
Рис. 4.4. Схемы приложения усилий изгибов в шестивалковой клетки



а



б



в

Рис. 4.5. Нагрузочные схемы промежуточного (а), рабочего (б) валков шестивалковой клетки и рабочего валка (в) четырехвалковой клетки:
 q – распределение силы прокатки по ширине полосы;
 q_1 – распределение межвалковой контактной силы по длине бочки рабочего или промежуточного валков; q_2 – распределение межвалковой контактной силы по длине активной образующей бочки опорного валка;
 $Q_p^пр$, $Q_p^доп$, $Q_пр^пр$, $Q_пр^доп$ – силы принудительного изгиба рабочих или промежуточных валков; c_p , $c_пр$, $n_оп$ – расстояния от точки приложения силы гидроизгиба до края активной части бочки рабочего, промежуточного и опорного валков; $L_пр$ и L_p – длины бочек промежуточного и рабочего валков;
 $a_пр$ и a_p – расстояния между точками приложения сил гидроизгиба промежуточного и рабочего валков

При определении прогиба рабочего вала в сечении, соответствующем кромке полосы, можно принять, что в этом сечении действует бесконечно малая фиктивная сила F , направленная вдоль положительного направления оси y . Эта бесконечно малая сила не изменит величину прогиба от действительной нагрузки, но позволит определить фиктивный момент в сечении x : $M(x) = Fx$, а также $\partial M(x)/\partial F = x$ и $\partial Q(x)/\partial F = 1$. Подставляя эти значения в уравнения (4.10), можно получить

$$y'_p = \frac{1}{E_p J_p} \int_{c_p}^{\frac{a_p-b}{2}} M(x) x dx; \quad y'_{\text{пр}} = \frac{1}{E_{\text{пр}} J_{\text{пр}}} \int_{c_{\text{пр}}}^{\frac{a_{\text{пр}}-b}{2}} M(x) x dx; \quad (3.11)$$

$$y''_p = \frac{1}{G_p F_p} \int_{c_p}^{\frac{a_p-b}{2}} Q(x) dx; \quad y''_{\text{пр}} = \frac{1}{G_{\text{пр}} F_{\text{пр}}} \int_{c_{\text{пр}}}^{\frac{a_{\text{пр}}-b}{2}} Q(x) dx.$$

В результате интегрирования были получены формулы прогибов рабочего y'_p , y''_p и промежуточного $y'_{\text{пр}}$, $y''_{\text{пр}}$ валков при противоизгибе в сечении, соответствующем кромке полосы (табл. 4.2).

Также были получены формулы для расчета прогиба рабочих валков от усилий гидроизгиба в сечении, соответствующем кромке полосы в четырехвалковой клетки. Рабочий валок рассматривался как балка с защемленным концом, нагруженная сосредоточенной силой $Q_p^{\text{пр}}$ или $Q_p^{\text{доп}}$ и равномерно распределенными нагрузками $q = P/b$ и $q_2 = P_{\text{оп}}/(L_{\text{оп}} - 2l_{\text{ск}})$ (рис. 4.5, в). Формулы для расчета прогиба при действии противоизгиба приведены в табл. 4.3.

В табл. 4.2 и 4.3 приняты следующие обозначения: E_p , $E_{\text{пр}}$ и G_p , $G_{\text{пр}}$ – модули упругости и сдвига материала рабочих и промежуточных валков; J_{δ_p} , $J_{\delta_{\text{пр}}}$ и F_{δ_p} , $F_{\delta_{\text{пр}}}$ – моменты инерции и площади сечений бочек рабочего и промежуточного валков. При дополнительном изгибе в выражениях п. 2 и п. 3 табл. 4.2 и в табл. 4.3 $Q_p^{\text{пр}}$ и $Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}$ заменяют соответственно на $Q_p^{\text{доп}}$ и $Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}$ со знаком «минус».

Таблица 4.2

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

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

Таблица 4.3

Выражения прогиба рабочего валка четырехвалковой клетки по кромке полосы при действии усилий противоизгиба

Прогиб от действия изгибающих моментов	Прогиб от действия поперечных сил
Суммарный прогиб рабочего валка	
$y_{Q_{p4}^{np}} = y'_{Q_{p4}^{np}} + y''_{Q_{p4}^{np}}$	
$y'_{Q_{p4}^{np}} = \frac{Q_p^{np}}{3E_p J_{\delta_p}} (m_p^3 - c_p^3) +$ $+ \frac{q}{24E_p J_{\delta_p}} (m_p^4 - 3c_p^4 + 2m_p c_p^2 (4c_p - 3m_p)) -$ $- \frac{q_2}{24E_p J_{\delta_p}} (3m_p^4 - 3c_p^4 + 2m_p^2 n_{он} (3n_{он} - 4m_p)) +$ $+ 2c_p^2 n_{он} (4c_p - 3n_{он}))$	$y''_{Q_{p4}^{np}} = \frac{Q_p^{np}}{G_p F_{\delta_p}} (m_p - c_p) - \frac{q}{2G_p F_{\delta_p}} (m_p - c_p)^2 -$ $- \frac{q_2}{2G_p F_{\delta_p}} (m_p^2 - c_p^2 + 2n_{он} (c_p - m_p))$
где $m_p = \frac{a_p - b}{2}$	

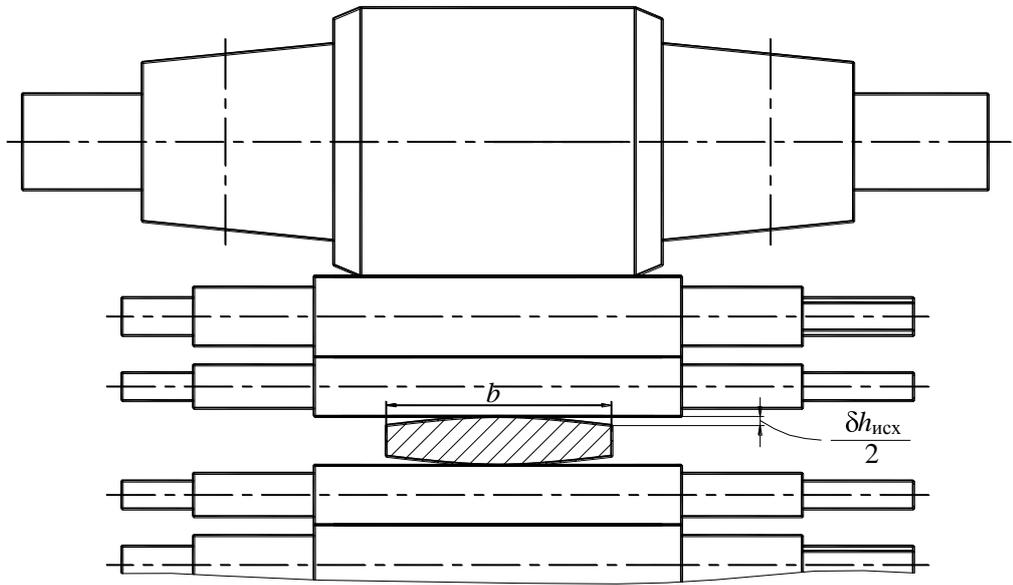
При исследовании значений сплющивания $\delta_1^{Q_p^{np}}$, $\delta_2^{Q_p^{np}}$, $\delta_1^{Q_p^{доп}}$, $\delta_2^{Q_p^{доп}}$ от усилий гидроизгибов в сечении по кромке полосы по формулам Б.С. Ковальского (4.2) и (4.4) было получено, что эти значения на 2-3 порядка меньше значений прогибов валков $y_{Q_p^{np}}$, $y_{Q_p^{доп}}$ от усилий гидроизгибов. Поэтому для определения поперечной разнотолщинности при приложении усилий гидроизгиба было принято, что на упругую деформацию оказывает воздействие только прогиб валков. С учетом этого допущения и формул (4.1) и (4.9) выражение (4.8) можно представить в следующем виде

$$\delta h = (2y_a - y_b - y_{Q_p^{np}} - y_{Q_p^{доп}} + y_{Q_p^{доп}} + y_{Q_p^{доп}}). \quad (4.12)$$

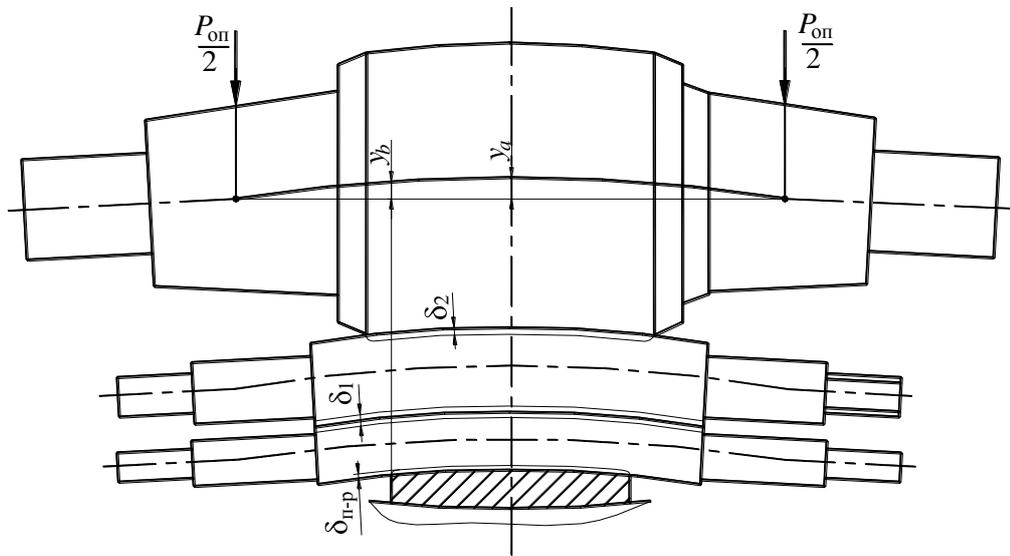
Исходя из изложенного, влияние гидроизгиба рабочего и промежуточного валков в шестивалковой клетки на поперечный профиль полосы можно представить с помощью схем, показанных на рис. 4.6 и 4.7.

На схеме *a* рис. 4.6 показано исходное поперечное сечение полосы с поперечной разнотолщинностью $\delta h_{исх}$, прогибы и сплющивания валков отсутствуют; *б* – представлен результат деформации валков от действия усилия прокатки: опорный валок прогибается и воздействует своей бочкой на бочку промежуточного валка, заставляя последний прогибаться и в свою очередь воздействовать на бочку рабочего валка, вызывая его прогиб. При этом обеспечивается плотный контакт рабочего валка с полосой на ширине *b* и происходят упругие сплющивания валков и полосы.

На схеме *a* рис. 4.7 показан результат воздействия усилия противоизгиба рабочих валков относительно схемы *б* рис. 4.6. При приложении усилий Q_p^{np} профиль рабочего валка изменяется, происходит его прогиб и сплющивание рабочих и промежуточных валков. Линия *1* показывает исходный профиль полосы. При этом поперечная разнотолщинность равна $\delta h = y_{ср} - y_{кр} - 2y_{Q_p^{np}}$ или $\delta h = 2(y_a - y_b - y_{Q_p^{np}})$.



a



б

Рис. 4.6. Расчетная схема для определения поперечной разнотолщинности:

a – исходное состояние;

б – результат деформации валков от действия усилия прокатки

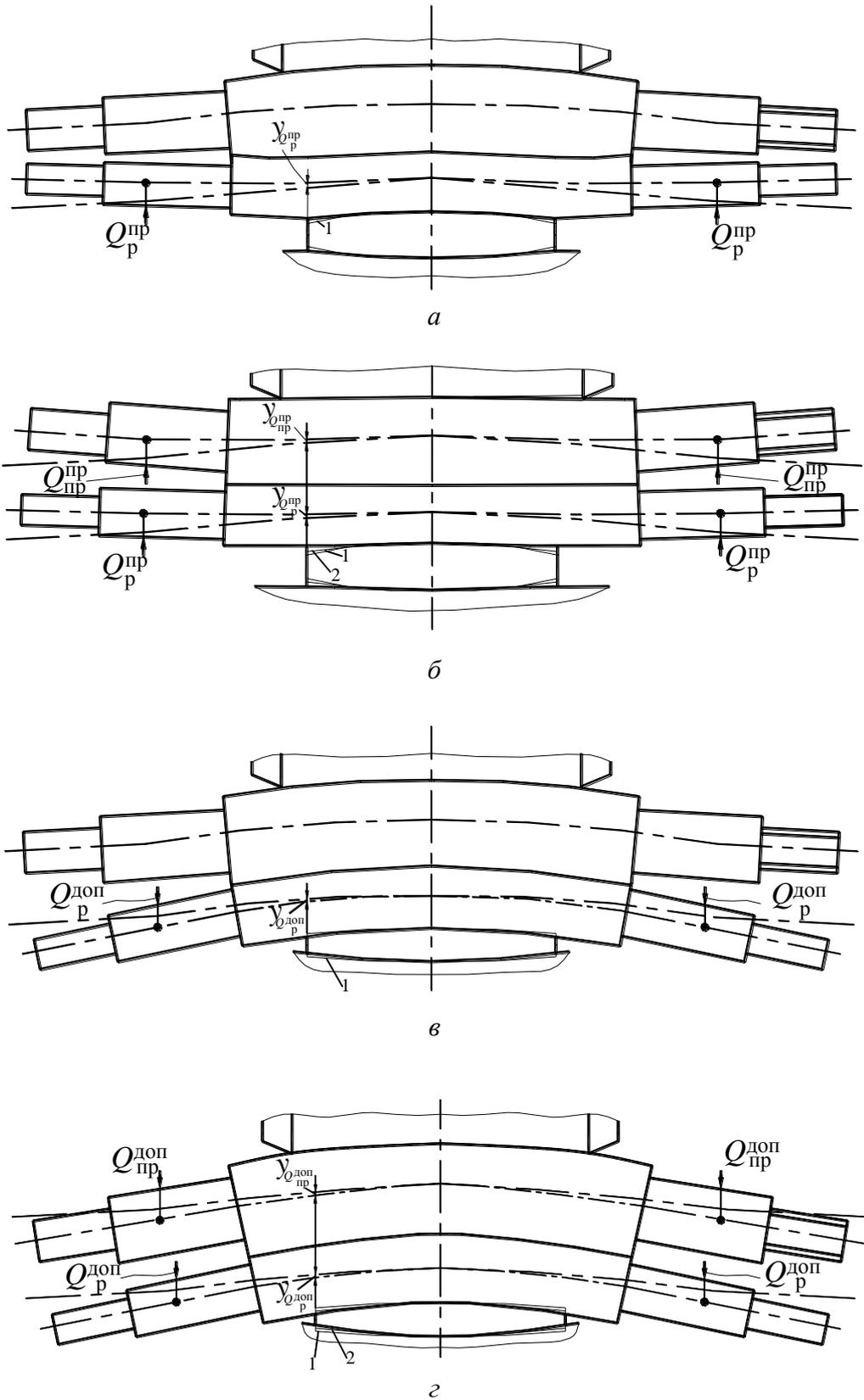


Рис. 4.7. Схемы влияния гидроизгибов валков в шестивалковой клети на поперечный профиль полосы: 1 – исходный профиль полосы; 2 – профиль полосы, получаемый в результате воздействия гидроизгиба на рабочий валок

На схеме б рис. 4.7 дополнительно действует противоизгиб промежуточных валков $Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}$ относительно схемы в. При воздействии усилий гидроизгиба на промежуточные валки появляется их прогиб и сплющивание между опорными и промежуточными валками, что влияет на профиль промежуточных валков, вызывая изменения профиля активной образующей рабочего валка. Линия 2 показывает профиль полосы, получаемый в результате воздействия гидроизгиба на рабочий валок. При этом $\delta h = y_{\text{ср}} - y_{\text{кр}} - 2y_{Q_{\text{р}}^{\text{пр}}} - 2y_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}}$ или $\delta h = 2(y_a - y_b - y_{Q_{\text{р}}^{\text{пр}}} - y_{Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}})$. На схеме в рис. 4.7 показан результат воздействия усилия дополнительного изгиба рабочих валков относительно схемы б рис. 4.6. При приложении усилий $Q_{\text{р}}^{\text{доп}}$ профиль рабочего валка изменяется, происходят прогиб и сплющивание рабочих валков и полосы. При этом поперечная разнотолщинность равна $\delta h = y_{\text{ср}} - y_{\text{кр}} + 2y_{Q_{\text{р}}^{\text{доп}}}$ или $\delta h = 2(y_a - y_b + y_{Q_{\text{р}}^{\text{доп}}})$. На схеме з рис. 4.7 дополнительно действует $Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}$ промежуточных валков, относительно схемы д. При воздействии усилий дополнительного изгиба на промежуточные валки появляется их прогиб и сплющивание между промежуточными и рабочими валками. Поперечная разнотолщинность может быть определена $\delta h = y_{\text{ср}} - y_{\text{кр}} + 2y_{Q_{\text{р}}^{\text{доп}}} + 2y_{Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}}$ или $\delta h = 2(y_a - y_b + y_{Q_{\text{р}}^{\text{доп}}} + y_{Q_{\text{пр}}^{\text{доп}}})$.

Изложенные выше расчетные схемы и формулы в совокупности представляют собой математическую модель упругих деформаций клетки, которую следует использовать в качестве теоретической базы при конструировании шестивалковых клетей и анализе их эффективности при регулировании показателей точности прокатываемых полос.

На основе модели упругих деформаций можно оптимизировать технологию производства широкополосной стали, разработав модель шлифовочной профилировки валков с целью улучшения качества полос, сокращения перевалок валков и уменьшения оборотного парка валков.

4.3. Оценка достоверности результатов моделирования упругих деформаций и жесткости четырех- и шестивалковых клетей

Поскольку на заводах черной металлургии в России действующие шестивалковые клетки отсутствуют, достоверность результатов моделирования параметров шестивалковых клетей проверялась двумя методами. Первый – сравнением результатов с опубликованными результатами зарубежных авторов [46]. Для этого была осуществлена программная реализация моделей, описанных в п. 4.1, и выполнено исследование четырех- и шестивалковых клетей с параметрами, приведенными в работе [46]. В табл. 4.4 представлено сравнение упругих деформаций узлов клетей при усилии прокатки 25 МН. В расчетных значениях ширина полосы равна 1000 мм, первый вариант получен для шестивалковых клетей с $D_p = 420$ мм; $D_{пр} = 520$ мм; $D_{оп} = 1300$ мм и для четырехвалковых – $D_p = 420$ мм; $D_{оп} = 1400$ мм; второй вариант для шестивалковых клетей – $D_p = 470$ мм; $D_{пр} = 580$ 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 клетей $L_p = L_{оп} = 1880$ мм; $L_{пр} = 2120$ мм и четырехвалковых клетей $L_p = 2080$ 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

$$H_{ок_6} = 3,1(D_p + D_{пр} + D_{оп}); \quad H_{ок_4} = 3,1(D_p + D_{оп}). \quad (4.13)$$

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

Таблица 4.4

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

Элементы клетки и показатели ее упругой деформации	Шестивалковая клеть				Четырехвалковая клеть			
	Данные работы [46]	Расчетные значения		Расхождение, %	Данные работы [46]	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

Также для проверки и сравнения с результатами работы [46] был выполнен расчет упругих деформаций валковых узлов методом конечных элементов в САЕ-системе для каждого варианта конструкции, при тех же параметрах, что и табл. 4.4. Для этого были созданы объемные (3D) модели валковых узлов. Прогиб валковой системы определялся с помощью МКЭ как сумма прогибов каждого валка (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Значения деформаций валковых узлов, рассчитанных методом конечных элементов, мм

Элементы клетки	Шестивалковая клеть		Четырехвалковая клеть	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
Рабочий валок	0,835	0,82	0,829	0,818
Промежуточный валок	0,664	0,639	-	-
Опорный валок	0,449	0,44	0,46	0,431
Валковый узел	3,896	3,798	2,578	2,498
Валковый узел (по данным работы [46])	3,67 – 4,003		2,496 – 2,729	

В табл. 4.5 показано, что значения упругих деформаций валковых узлов, рассчитанных методом конечных элементов, попадают в диапазоны, приведенные в работе [46].

Второй метод проверки был осуществлен с помощью численного эксперимента: путем сравнения результатов моделирования аналитическим методом и численным методом в САЕ-системе.

Численный эксперимент по анализу разнотолщинности листа был выполнен с различными значениями сил противоизгиба для двух вариантов конструкций клеток: шестивалковой клетки с $D_p = 200$ мм, $D_{пр} = 450$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм и четырехвалковой клетки с $D_p = 200$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм. Была выбрана схема противоизгиба валков, поскольку, как отмечено в литературе [11], она зарекомендовала себя наиболее эффективной для регулирования профиля валков на широкополосных станах с длиной бочки до 2000 мм. Усилие прокатки принималось 5 МН, ширина полосы 1400 мм.

В этом случае при создании трехмерной модели (рис. 4.8) учтена симметрия относительно прокатываемого листа и вертикальной плоскости, проходящей через вертикальные оси валков.

Нагрузка задавалась на бочку рабочего валка – это усилие прокатки, действующее на длине, равной ширине полосы, к шейкам рабочего и промежуточного валков, в месте установки подшипникового узла, было приложено усилие противоизгиба и на шейки опорного валка – усилие $P/2$; валки закреплялись по осям подшипников – опорные с жесткой заделкой, рабочие и промежуточные с возможностью перемещения вдоль вертикальной плоскости.

Результаты проверки аналитических формул численным экспериментом приведены в табл. 4.6. Расхождение результатов проверки аналитических формул численным экспериментом не превысило 8%.

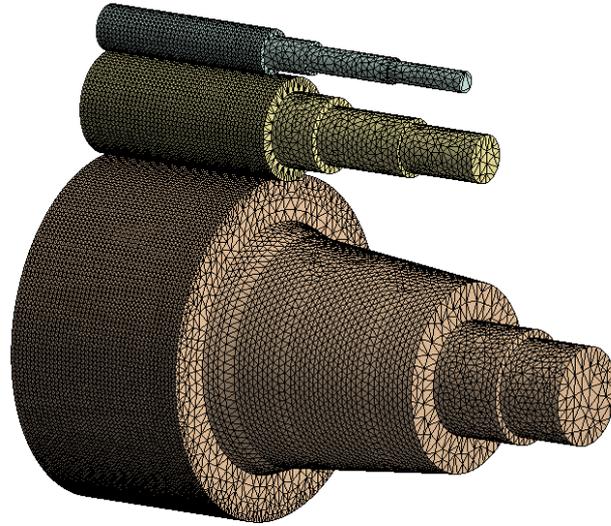
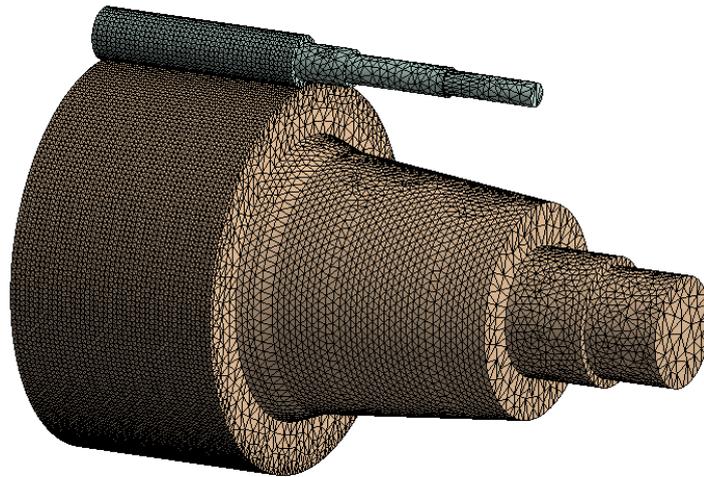
*a**б*

Рис. 4.8. Сеточные модели клеток:
a – шестивалковой $D_p = 200$ мм, $D_{np} = 450$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм;
б – четырехвалковой $D_p = 200$ мм, $D_{оп} = 1500$ мм

Сравнение с результатами, полученными МКЭ в САЕ-системе
(числители – аналитический метод, знаменатели – численный метод)

Сила проитивоизгиба валков, (в процентах от P)		Перемещение активной образующей каждого рабочего валка, мм		Поперечная разнотолщин- ность $\delta h_{\text{поп}}$, мм	Расхождение аналитического и численного расчетов, %
рабочих	промежуточных	в середине	по кромке		
Шестивалковая клеть					
0	0	$\frac{0,261}{0,29}$	$\frac{0,222}{0,249}$	$\frac{0,078}{0,082}$	4,9
5	0		$\frac{0,232}{0,258}$	$\frac{0,058}{0,064}$	9,4
5	5		$\frac{0,235}{0,262}$	$\frac{0,052}{0,056}$	7,1
10	0		$\frac{0,237}{0,264}$	$\frac{0,048}{0,052}$	7,7
10	10		$\frac{0,25}{0,278}$	$\frac{0,022}{0,024}$	8,3
					среднее: 7,48
Четырехвалковая клеть					
0	0	$\frac{0,208}{0,225}$	$\frac{0,172}{0,186}$	$\frac{0,072}{0,078}$	7,7
5	0		$\frac{0,176}{0,19}$	$\frac{0,064}{0,07}$	8,6
10	0		$\frac{0,18}{0,195}$	$\frac{0,056}{0,06}$	6,7
					среднее: 7,67

Сопоставление данных свидетельствует о достоверности разработанных аналитических методик, их пригодности для определения оптимальных параметров клетей листовых станов и сравнении их эффективности при регулировании показателей точности прокатываемых полос.

4.4. Результаты сопоставления упругих деформаций четырёх- и шестивалковых клетей

На основе исследований модели энергосиловых параметров шестивалковых клетей, изложенных в работах [55-58], установлено, что один из наиболее экономичных и технологичных вариантов конструкции клетей данного типа – клеть с рабочими валками диаметром 200 мм и с главным приводом через промежуточные валки. Такие клетки, наряду с существенным снижением среднего давления, усилия и момента прокатки, обеспечивают

минимальный прогиб валков, в них облегчаются условия регулирования поперечного профиля полос и листов, меньше затраты на перешлифовку, легче и дешевле станки, проще перевалка валков. Поэтому в качестве вариантов для компьютерного моделирования были приняты конструкции шестивалковой клетки с вариантом соотношения диаметров бочек валков: $D_{\text{оп}}/D_{\text{р}} = 7,5$; $D_{\text{оп}}/D_{\text{пр}} = 3,3$ ($D_{\text{р}} = 200$ мм, $D_{\text{пр}} = 450$ мм, $D_{\text{оп}} = 1500$ мм) и четырехвалковой клетки с теми же соотношением диаметров: $D_{\text{оп}}/D_{\text{р}} = 7,5$ ($D_{\text{р}} = 200$ мм, $D_{\text{оп}} = 1500$ мм).

При определении деформации станины за основу были взяты размеры реальной станины стана 1700 (толщина поперечины $a_{\text{пп}} = 700$ мм; высота поперечины $b_{\text{пп}} = 1400$ мм; толщина стойки $a_{\text{ст}} = 700$ мм; ширина стойки $b_{\text{ст}} = 825$ мм; $B_{\text{ок}} = 1,1D_{\text{оп}} = 1650$ мм). Изменялась только высота окна станины по формулам (4.13).

В табл. 4.7 представлены рассчитанные данные по упругой деформации клеток «кварто» и шестивалковой клетки как в целом, так и по отдельным элементам – системы валков, станины, а также жесткости. Учитывая возможность прокатки высокопрочных легированных сталей, усилие прокатки изменялось до 10 МН.

Сравнение результатов моделирования по аналитическим формулам и численным методом (табл. 4.7) поперечной разнотолщинности полос показывает, что гидроизгиб только рабочих валков на 40% продуктивней в шестивалковой клетки в сравнении с четырехвалковой. При противоизгибе промежуточных валков возможности регулирования в шестивалковой клетки возрастают еще больше (до 70%).

Сопоставление эффективности регулирования поперечного профиля полосы в четырехвалковой и шестивалковой клетях при $L_{\text{р}} = 1700$ мм, $b_{\text{п}} = 1400$ мм, $P = 5$ МН показано в табл. 4.8.

Таблица 4.7

Сравнение упругих деформаций шестивалковой клетки (числитель)
и четырехвалковой клетки (знаменатель) при $b = 1400$ мм

Элементы клетки и показатели ее упругой деформации	Усилие прокатки, МН				
	2	4	6	8	10
Система валков, мм	$\frac{0,254}{0,176}$	$\frac{0,487}{0,338}$	$\frac{0,711}{0,494}$	$\frac{0,928}{0,646}$	$\frac{1,141}{0,796}$
Станина, мм	$\frac{0,071}{0,068}$	$\frac{0,148}{0,136}$	$\frac{0,222}{0,203}$	$\frac{0,296}{0,271}$	$\frac{0,37}{0,339}$
Суммарная упругая деформация клетки, мм	$\frac{0,494}{0,366}$	$\frac{0,953}{0,71}$	$\frac{1,399}{1,046}$	$\frac{1,836}{1,376}$	$\frac{2,267}{1,702}$
Жесткость клетки, МН/мм	$\frac{4,047}{5,466}$	$\frac{4,197}{5,634}$	$\frac{4,289}{5,738}$	$\frac{4,358}{5,814}$	$\frac{4,412}{5,875}$

Таблица 4.8

Эффективность регулирования поперечного профиля полосы в
шестивалковой и четырехвалковой клетях

Показатель	Значение показателя		Отношение показателей (шестивалковая/четыревалковая)
	в шестивалковой клетки	в четырехвалковой клетки	
Суммарная упругая деформация клетки, мм	2,27	1,7	1,34
Жесткость клетки, МН/мм	4,41	5,87	0,75
Максимально возможное изменение поперечного профиля с помощью гидроизгиба валков	0,056 мм (71,8%)	0,016 мм (22,2%)	3,5

На основании этих результатов можно сделать следующие выводы:

1. Упругая деформация валков шестивалковой клетки больше упругой деформации валков четырехвалковой клетки на величину сжатия по контакту рабочих и промежуточных валков.

2. Деформация станины шестивалковых клетей, при равных усилиях прокатки, в 1,1 раза больше деформации станины четырехвалковых клетей.

3. Жесткость четырехвалковой клетки, при одинаковых усилиях прокатки и диаметрах рабочих и опорных валков, на 25 % больше жесткости шестивалковой клетки. Уменьшение жесткости шестивалковой клетки объясняется упругим сплющиванием промежуточного валка и увеличением размеров станины.

4. 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.

Поэтому шестивалковые клетки целесообразно применять, если к сортаменту вновь проектируемого или реконструируемого стана предъявляются следующие требования:

1. Диапазон профилируемых размеров и марок сталей включает холоднокатаные полосы толщиной 0,1-0,2 мм, в том числе – из высокопрочных легированных сталей.

2. Горячекатаный подкат толщиной 1,0-1,5 мм, используемый для производства холоднокатаных полос указанных минимальных толщин, должен иметь высокую точность в отношении продольной разнотолщинности: колебания его толщины не должны превышать 0,09-0,12 мм, что соответствует уровню стандартов промышленно развитых стран.

3. Требования к показателям неплоскостности холоднокатаных полос толщиной 0,1-0,2 мм установлены самые жесткие, соответствующие категории «особо высокая плоскостность» (отклонения от плоской формы не должны превышать 2-4 мм на 1 м длины листа).

Таким образом, описанные результаты применения модели упругих деформаций для сопоставительного анализа жесткости шестивалковой и четырехвалковой клетей и их эффективности при регулировании показателей точности прокатываемых полос позволяют обосновывать выбор конструкции

рабочей клетки по критериям минимальной разнотолщинности полосы, как в продольном, так и поперечном направлениях.

Выводы по главе 4

1. Для определения диапазонов сортамента полос, при прокатке которых целесообразно использовать шестивалковые клетки, впервые разработан аналитический метод расчета, который учитывает упругие сжатия валков в межвалковом контакте и в зоне контакта рабочего валка с полосой, а также воздействие принудительного гидроизгиба валков.

2. Впервые получены выражения для определения упругих деформаций валковой системы шестивалковой клетки в середине бочки валков, определяющих продольную разнотолщинность полосы, и выражения для определения прогибов рабочих и промежуточных валков по кромке полосы при действии усилий гидравлического изгиба, определяющих поперечную разнотолщинность полосы.

3. Достоверность результатов расчета аналитическим методом подтверждена путем сопоставления их с опубликованными данными зарубежных авторов и с результатами численных экспериментов в САЕ-системе. Расхождение результатов находится в диапазоне 0-10%.

4. С использованием разработанного метода установлено, что жесткость шестивалковой клетки, при одинаковых усилиях прокатки и диаметрах рабочих и опорных валков, на 25% меньше жесткости четырехвалковой клетки. Уменьшение жесткости шестивалковой клетки объясняется упругим сплющиванием промежуточного валка и увеличением размеров станины.

5. Установлено, что диапазон воздействия на поперечный профиль полосы в шестивалковой клетке в 3,5 раза больше, чем в четырехвалковой, благодаря возможности осуществить гидроизгиб не только рабочих, но и промежуточных валков.

6. На основании результатов сопоставительного расчета сформулированы требования к сортаменту холоднокатаных полос, при производстве которых использование шестивалковых клетей более целесообразно, чем четырехвалковых.

Заключение

Выполнены исследования профилировок и упругих деформаций валков рабочих клетей листовых станов и развитие методов их моделирования с целью усовершенствования 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, исключая их преждевременные поверхностные разрушения.

5. Разработан отсутствовавший ранее аналитический метод расчета упругих деформаций шестивалковых клеток, с применением которого выполнен сопоставительный анализ жесткости шестивалковой и четырехвалковой клеток 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.

Литература

1. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчет и исследование прокатных валков. – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.
2. Совершенствование теплового процесса листовой прокатки / А.В. Третьяков, Э. А. Гарбер, Л. Н. Шичков и др. – М.: Металлургия, 1973. – 304 с.
3. Тепловой расчет валков толстолистовых станов / А.Н. Шичков, Э.А. Гарбер, К.Н. Ткалич и др. // Производство листа: Темат. отрасл. сб. – 1975. – №3. – С. 27-37.
4. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки: Монография. – Череповец, изд-во ЧГУ, Москва, изд-во «Теплотехник», 2013. – 113 с.
5. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М.: ОАО "Черметинформация"; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. – 416 с.
6. Гарбер Э.А. Производство проката: Справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование). – М.: Теплотехник, 2007. – 368 с.
7. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Г.Г. Григорян, Ю.Д. Железнов, В.А. Кузнецов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
8. Профилирование валков листовых станов / А.А. Будакова, Ю.В. Коновалов, К.Н. Ткалич и др. – К.: Техніка, 1986. – 190 с.
9. Борисов В.И., Иванов В.А. Метод определения рабочих профилей валков листопркатных станов и его анализ. // Производство проката. – 2006. – № 3. – С. 2-14.
10. В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта. Алгоритмы и программный продукт «Профиль 2500» для прогнозирования и оценки профиля, плоскостности горячекатаных полос и состояния опорных валков

стана 2500 горячей прокатки // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2008. – №7. – С. 50-54.

11. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты прокатных цехов. Учебник для вузов / Целиков А.И., Полухин П.И., Гребник В.М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.

12. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.

13. Грудев П.И. Прогиб валков вследствие совместного сплющивания рабочих и опорных валков // Обработка металлов давлением. Вып. 2. М.: Металлургиздат. – 1953. – С. 200-223.

14. Чепуркин С.С. Уравнение прогибов листопркатных валков // Производство и обработка стали: Сб. науч. тр. ЖдМИ. Вып. 5. Харьков: Металлургиздат. – 1960. – С. 346-371.

15. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. – М.: Металлургия. 1967. – 388 с.

16. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.

17. Салганик В.М. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто для повышения ее стойкости и качества прокатываемых полос // Пути развития машиностроительного комплекса Магнитогорского металлургического комбината: Сб. науч. тр. Вып. 2 «Прокатные валки». Магнитогорск: ПМП «МиниТип». – 1996. – С. 120-128.

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

19. Восканьянц А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния валковой системы клетки кварто 2500 // Производство проката. – 2001. – № 5. – С. 35-38.

20. Управление качеством тонколистового проката / В. Л. Мазур, А. М. Сарьян, И. Ю. Приходько и др. – Киев: Техніка, 1997. – 384 с.
21. Савранский К.Н., Гарбер Э.А., Ламинцев В.Г. Пути экономии металла при производстве толстых листов. М.: Metallurgy, 1983. – 120 с.
22. Полухин П.И., Клименко В.М., Полухин В.П. и др. Прокатка толстых листов. М.: Metallurgy, 1984. – 288 с.
23. Николаев В.А., Путноки А. Ю. Прокатка широкополосной стали. К.: «Освита Украины», 2009. – 268с.
24. Профилирование валков толстолистовых станов /К.Н. Ткалич, А.А. Будаква, З. Г. Качалка и др. // Сталь. – 1976. – №3. – С. 248-250.
25. Коновалов Ю.В. Настоящее и будущее агрегатов для производства горячекатаных листов и полос// Производство проката. – 2008. – №7. – С.10-21.
26. Патент № 2129927 Российская Федерация, МПК В 21 В 27/02. Узел валков прокатной клетки полосового стана / Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В. – №98111796/02; Заявл. 15.06.1998; Оpubл. 10.05.1999, Бюл. №13.
27. Патент № 2268795 Российская Федерация, МПК В 21 В 13/14. Прокатная клеть с парой CVC-валков / Хартунг Х., Кламма К., Роде В. и др. – № 2003106400/02; Заявл. 25.07.2001; Оpubл. 27.01.2006, Бюл. №3.
28. Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В. Основы конструирования механизма осевого смещения валков CVC листовых станов. // Пути развития машиностроительного комплекса ММК. Вып. 2. Прокатные валки. Магнитогорск. – 1996. – С. 111-119.
29. В.Д. Плахтин, В.Я. Тишков, В.П. Сергеев. Профилирование скрещивающихся рабочих валков для прокатки полос// Сталь. – 2001. – №4. – С. 42-45.
30. А.И. Трайно, В.С. Юсупов, Э.А. Гарбер и др. Исследование износа рабочих валков НШС// Производство проката. – 2000. – №7. – С. 12-14.

31. Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.Ф. Савиных и др. Взаимодействие валков и полосы на широкополосном стане горячей прокатки // Сталь. – 2008. – №3. – С. 51-53.

32. Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.Ф. Савиных и др. Промышленные испытания усовершенствованных профилировок рабочих валков на широкополосном стане горячей прокатки // Производство проката. – 2008. – №4. – С. 18-22.

33. Патент № 2361690 Российская Федерация, МПК В 21 В27/02. Способ профилирования рабочих валков полосового прокатного стана / Гарбер Э.А., Торопов С.С., Смирнов В.С. и др. – № 2008105240/02; заявл. 01.02.2008; опубл. 20.07.09.

34. Патент №2319560. Российская Федерация, МПК В 21 В 1/26. Способ профилирования валков чистой группы клетей кварто стана горячей прокатки полос / Степанов А.А., Гейер В.В., Краев А.Д. и др. – №2006119136/02; Заявл. 31.05.2006; Опубл. 20.03.2008, Бюл. №8.

35. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты прокатных цехов. Учебник для вузов / Целиков А.И., Полухин П.И., Гребник В.М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.

36. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.

37. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. – М.: Теплотехник, 2008. – 608 с.

38. Василев Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой стали. – Издательское объединение «Вища школа», 1975. – 192 с.

39. Механическое оборудование цехов холодной прокатки / Под ред. Г.Л. Химича. – М.: Машиностроение, 1972. – 536 с.

40. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1985. – 376 с.
41. Технология процессов обработки металлов давлением. / Полухин П.И., Хензель А., Полухин В.П. и др. / Под ред. П.И. Полухина – М.: Metallurgy, 1988. – 408 с.
42. Рудской А. И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. – СПб.: Наука, 2005. – 540 с.
43. Боровик Л.И., Добронравов А.И. Технология подготовки и эксплуатации валков тонколистовых станов. – М.: Metallurgy, 1984. – 104 с.
44. Влияние профилировок рабочих и опорных валков на шероховатость поверхности широких холоднокатаных автомобильных листов. / Э. А. Гарбер, М. А. Тимофеева, С. И. Павлов и др. // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 9-13.
45. Исследование и устранение сверхнормативной шероховатости поверхности прикромочных участков широких холоднокатаных полос / Э. А. Гарбер, М. А. Тимофеева, С. И. Павлов и др. // Вестник ЧГУ. – Череповец: ЧГУ. – 2011. – № 4. Том 2. – С. 5-8.
46. 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. – С. 219-226.
47. Сравнение четырех- и шестивалковых станов холодной прокатки / Г.Финстерманн, А. Селлингер, Г. Нопп, Г. Джумлия // Черные металлы. – 2007. – №3. – С. 33-40.
48. Гарбер Э.А. Математическое обеспечение модернизации широкополосных станов холодной прокатки // Труды II Конгресса прокатчиков. – М. Ин-т «Черметинформация». – 1998. – С. 219-227.
49. Пелькинг Х.-Й., Шиллинг Т. Улучшение качества холоднокатаных полос путем внедрения высокотехнологичного оборудования // Труды II

Конгресса прокатчиков. – М.: Ин-т «Черметинформация». – 1998. – С. 153-157.

50. Пелькинг Х.-Й. Новейшие технологии холодной прокатки // Труды III Конгресса прокатчиков. – М.: Ин-т «Черметинформация». – 2000. – С. 152-154.

51. Матвеев Б.Н. Совершенствование технологии и оборудования для холодной прокатки полос // Производство проката. – 2003. – №2. – С. 19-23.

52. Горбасев Н.И., Оратовский Е.Л., Сафонова М.К. Применение шестивалковых клетей на широкополосных станах // Черная металлургия. – М.: Ин-т «Черметинформация». – 1985. – № 24. – С. 3-13.

53. Шаталов Р.Л., Койнов Т.А., Литвинова Н.Н. Автоматизация технологических процессов прокатки и термообработки металлов и сплавов. Учебное пособие / Под науч. ред. Р.Л. Шаталова. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2010. – 368 с.

54. Беньковский М.А., Масленников В.А. Автомобильная сталь и тонкий лист. – Череповец: Изд. дом «Череповец», 2007. – 636 с.

55. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Дилигенский Е.В. Основы расчета и конструирования шестивалковых клетей широкополосных станов // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Г.С. Гуна. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2006. – № 34. – С. 41-52.

56. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Дилигенский Е.В. Методология конструирования шестивалковых клетей широкополосных станов холодной прокатки // Производство проката. – 2007. – № 1. – С. 6-15.

57. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Траино А.И. Энергосиловые параметры шестивалковых клетей широкополосных станов // Металлы. – 2007. - № 1. – С. 50-60.

58. Garber E.A., Bolobanova N.L., Traino A.I. Energy-force parameters of six-high stands in wide-strip rolling mills // Russian Metallurgy. – Vol. 2007. – No. 1. – P. 41-50.

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

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

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

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

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

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

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

66. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Повышение точности моделирования поперечной разнотолщинности широких полос с использованием метода

конечных элементов // Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". – 2012. – № 12. – С. 50-53.

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

68. Зенкевич О. Метод конечный элементов в технике. Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.

69. Деклу Ж. Метод конечный элементов. Пер. с франц. – М.: Мир, 1976. – 96 с.

70. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

71. Галлагер Р. Метод конечный элементов. Основы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

72. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с.

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

74. Инновационная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с жесткими допусками по толщине / Э. А. Гарбер, М. А. Тимофеева, И.Д. Пospelов и др. // Всероссийский научный семинар «Научно-технический прогресс в металлургии». – Череповец: ЧГУ. – 2011.

75. Промышленная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с разнотолщинностью по всей площади, не превышающей $\pm 2\%$ / Э. А. Гарбер, М. А. Тимофеева, И.Д. Пospelов и др. // Производство проката. – 2012. – № 6. – С.10-15.

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

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

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

79. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

80. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.

81. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т. I. Элементарная теория и задачи. – М.: Наука, 1965. – 364 с.

82. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
 результатов работ**

по договору № 986НП/ТД0167 от 22.12.09 г.

«Исследование факторов, вызывающих разнотолщинность холоднокатаной стали и наличие прикромочных участков полос со сверхнормативной шероховатостью; разработка усовершенствованной технологии её производства с допусками по толщине и шероховатости согласно требованиям заказчиков»

Краткое описание выполненной работы:

На основании результатов успешных промышленных испытаний рекомендовано внедрить следующие технические мероприятия:

1. Исключить выполнение скосов по краям бочек опорных валков 5[™] клетового стана «1700» ПХП, одновременно увеличить выпуклость рабочих валков при прокатке металла шириной менее 1200 мм.
2. Усовершенствованные технологические режимы и скорректированные профилировки валков чистовой группы стана «2000» ПГП (перераспределение обжатий, увеличение межклетевых удельных натяжений, уменьшение вогнутости рабочих валков).
3. Усовершенствованные технологические режимы и профилировки рабочих валков 5[™] клетового стана «1700» ПХП (увеличить скорость прокатки участков со сварными швами до 2,75-3 м/с, увеличенная выпуклость рабочих валков).

Охраноспособный результат: отсутствует.

Срок начала фактического внедрения: 1 декабря 2011 г.

Начальник ПХП

С.И. Павлов

Заместитель директора – главного инженера –
 начальник ЦТРК дивизиона СРС

Д.В. Коныгин

Старший менеджер ЦТРК

П.А. Мишнев

Главный специалист ЦТРК

В.В. Кузнецов

Руководитель работ от ОАО «Северсталь»

В.Ю. Антонов

А.Н. Чистяков

[Handwritten signature]

Луценко СВ

Заключение по результатам НИОКР

Наименование работы: «Исследование факторов, вызывающих разнотолщинность холоднокатаной стали и наличие прикромочных участков полос со сверхнормативной шероховатостью; разработка усовершенствованной технологии её производства с допусками по толщине и шероховатости согласно требованиям заказчиков»

Номер договора: 986НП/ТД0167 от 22.12.09 г.

Получен результат: положительный.

Сумма ожидаемой экономической выгоды (дохода): фактический экономический эффект будет получен, начиная со второго квартала 2012 г.

Срок, предполагаемый для внедрения: 1 декабря 2011 г.

Дата составления: 27.09.2011 г.

Начальник ПХП

Заместитель директора – главного инженера –
начальник ЦТРК дивизиона СРС

Старший менеджер ЦТРК 27.10.11

Главный специалист ЦТРК

Руководитель работ от ОАО «Северсталь»

С.И. Павлов

Д.В. Коньгин

П.А. Мишнев

В.В. Кузнецов

В.Ю. Антонов

ОАО «Северсталь»

ЛПЦ-3

ПРОТОКОЛ

Технического совещания по рассмотрению промежуточных результатов работы по договору №1021НП с ООО «Лаборатория металлургических процессов»

г. Череповец

08.07.2014 г.

Председатель: заместитель директора по экспертной работе Покровский Д.А.

Присутствовали:

От ЛПЦ-3: Коньгин Д.В., Запевалов В.П., Жидков Д.А.

От ЦТРК: Корчагин А.М., Сычев О.Н.

От ООО «Лаборатория металлургических процессов»: Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л.

РАССМОТРЕЛИ:

1. Результаты работы по второму этапу договора №1021НП «Разработка системы профилировок рабочих и опорных валков стана 5000 ЛПЦ-3».
2. Возможность выполнения предлагаемой профилировки опорного валка на шлифовальном станке вальцешлифовального отделения (ВШО) ЛПЦ-3.

РЕШИЛИ:

1. Результаты работы по второму этапу считать удовлетворительными.
2. **Беляеву А.А.** – Предоставить данные по разнотолщинности листов шириной более 4300 мм. Срок: 29.07.2014.
3. **Запевалову В.П.** – Запросить у представителей завода-изготовителя шлифовального станка возможность выполнения образующей предлагаемой кривизны на краевых участках опорного валка. Срок: 29.07.2014.
4. **Жидкову Д.А.** – Предоставить данные по износу опорных валков за рабочую кампанию. Срок: 29.07.2014.
5. **Гарберу Э.А.** – Рассмотреть возможность увеличения длины участка дополнительных закруглений образующей бочки опорного валка с 200 до 400 мм. Срок: 29.08.2014.
6. **Гарберу Э.А.** – Рассчитать контактные напряжения между рабочим и опорным валками в конце их рабочей кампании. Срок: 29.09.2014.
7. Продолжить работу в рамках следующих этапов календарного плана после реконструкции шлифовального станка КЖ ВШО ЛПЦ-3 (август 2015).
8. **Пиленовой Т.В.** – Составить и подписать от Северстали дополнительное соглашение к договору №1021НП о переносе сроков выполнения третьего, четвертого и пятого этапов на август, октябрь и декабрь 2015 соответственно. Срок: 29.07.2014.

Заместитель директора по экспертной работе

подпись

Д.А. Покровский

Верно: директор



Гарбер Э.А.