

PASSDESIGN.RU



ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО

ВЫПУСК 3

«КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО» Электронный научный журнал. Выпуск 3

Дата опубликования: 25.04.2014.

Издается в авторской редакции

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ: Кинзин Дмитрий Иванович.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Д.И. Кинзин – кандидат технических наук, доцент.

Технический редактор:

С.А. Левандовский – кандидат технических наук, доцент.

Адрес редакции: 455000, г.Магнитогорск, ул. Ломоносова, 34, 8.

Адрес в Интернет: www.passdesign.ru.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций и входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77–51759 от 23.11.2012

ISSN 2308-6440

© Кинзин Дмитрий Иванович

СОДЕРЖАНИЕ

Сортопрокатное производство	5
<i>О.Н. Тулунов, А.Б. Моллер</i>	
Эволюция методологического подхода к моделированию процессов сортовой прокатки в научной школе кафедры ОМД МГТУ им. Г.И.Носова	5
<i>В.А. Харитонов, И.В. Таранин</i>	
Направления развития калибровок валков для прокатки заготовки под волочение.....	34
<i>С.А. Левандовский, О.В. Сеницкий, Н.А. Ручинская</i>	
Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации.....	52
Листопрокатное производство	81
<i>О.В. Сеницкий, С.А. Левандовский</i>	
Совершенствование процесса формирования поперечного профиля проката на широкополосных станах.....	81
<i>М.В. Шитов</i>	
Изменения ширины сляба валками: область применения и направления развития.....	91
Валки прокатных станов	112
<i>Н.Г. Шемиурова, В.Г. Антипанов, Е.П. Киселева</i>	
Способы упрочнения поверхности рабочих валков.....	112
Секреты профессии	123
<i>Д.И. Кинзин</i>	
Контроль формы и размеров шаблонов с помощью планшетного сканера...	123
Калибровочное бюро (www.passdesign.ru). 2014. Выпуск 3 —————	3

Научно-популярная рубрика	131
<i>Д.И. Кинзин</i>	
Занимательные технологические задачи. Решение второй задачи и условие третьей.....	131
Сведения об авторах	135

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ В НАУЧНОЙ ШКОЛЕ КАФЕДРЫ ОМД МГТУ ИМ. Г.И.НОСОВА

Зарождение и развитие научной школы сортовой прокатки на кафедре ОМД МГТУ началось со времен основания кафедры М.И.Бояршиновым, что было продиктовано необходимостью создания работоспособных инженерных моделей расчета технических и технологических параметров сортовых станов и калибровки валков для условий сортопрокатного передела ММК.

Рассмотрим эволюцию методологического подхода к моделированию и исследованию технологических процессов сортовой прокатки, а также основные принципы математических моделей, возникавших в ходе развития научной школы под влиянием эволюции технологии, калибровки валков и развития требований к качеству продукции сортовых и проволочных станов горячей прокатки.

До 60-х годов XX века в основе характерных для научной школы сортовой прокатки инженерных методик расчета режимов сортовой прокатки, параметров калибровки профилей и валков лежали эмпирические модели, связанные с определением уширения металла в калибрах, как функции высотной деформации с учетом ряда технологических параметров, что в общем виде может быть представлено в виде функционала:

$$\beta = f \left\{ (K \sim 0,3 \div 0,4) \frac{H-h}{H} \sqrt{R(H-h)} \right\},$$

где K — эмпирический коэффициент;

$\frac{H-h}{H}$ – коэффициент высотного обжатия;

R, H, h – параметры геометрии очага деформации;

Такой подход был многократно уточнен в процессе изучения и совершенствования режимов прокатки на действующих сортовых станах и был характерен для работ Б.П. Бахтинова, Б.Б. Диомидова [1, 2], получив развитие и систематизацию в научных работах Н.В. Литовченко [2] по принципам расчета типовых калибровок валков.

Повышение в 60-80е годы XX века актуальности новых технологических процессов сортовой прокатки (прокатка в многовалковых калибрах), а также возросшая в 80-х годах необходимость поиска резервов вытяжной способности двухвалковых калибров действующих станов нашли отражение в изменении принципов математического моделирования процессов сортовой прокатки в работах М.Г. Полякова [3], а впоследствии В.А. Курдюмовой и С.А. Тулупова [4]. Указанные подходы принципиально отличал учет закономерностей и механизма течения металла в калибрах.

Так, например, в работах Тулупова С.А., который к 1984 году возглавил научную школу сортовой прокатки кафедры ОМД, и его коллег [5] было предложено разделение моделируемого очага деформации при прокатке в вытяжных калибрах на 5 характерных зон по длине (рис. 1) и учет вытяжной способности калибра исходя из соотношения обжимаемых и необжимаемых участков полосы по длине калибра. Так, при прохождении фиксированного сечения полосы вдоль очага деформации было предложено различать следующие этапы формоизменения: контакт сечения с валками (геометрическое начало очага деформации) – вход в очаг деформации; локальная контактная деформация в условиях плоского деформированного состояния при наличии упругих внеконтактных зон, являющихся связью для пластически деформируемых участков – участок μ ; деформация полосы по объемной схеме с отрицательным уширением кромок – участок ОП; продольная деформация полосы без отрицательного уширения кромок – участок П; выход из очага деформации.

$$\Delta b = 0,707\theta 2h_1 \frac{\eta - 1}{\eta} \sqrt{\left(\frac{D}{h} - 1\right)(\eta - 1)},$$

$$\text{где } \theta = \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,57 \frac{l_\mu}{l_{od}} + 0,08 \frac{l_{on}}{l_{od}} + 0,414 \frac{l_n}{l_{od}};$$

$\frac{D}{h}$ – приведенный диаметр;

η – степени деформации.

Для описания закономерностей формоизменения при сортовой прокатке был успешно применен топологический подход, а также использованы экспериментальные поляризационно-оптические модели.

В эти годы научная школа развивалась в двух направлениях:

- создание и развитие эффективных математических моделей калибровки валков, процессов сортовой прокатки и продольного профилирования;
- разработка новых и совершенствование действующих технологических процессов сортовой прокатки, калибровок валков и оборудования сортовых, проволочных и профилегибочных станов.

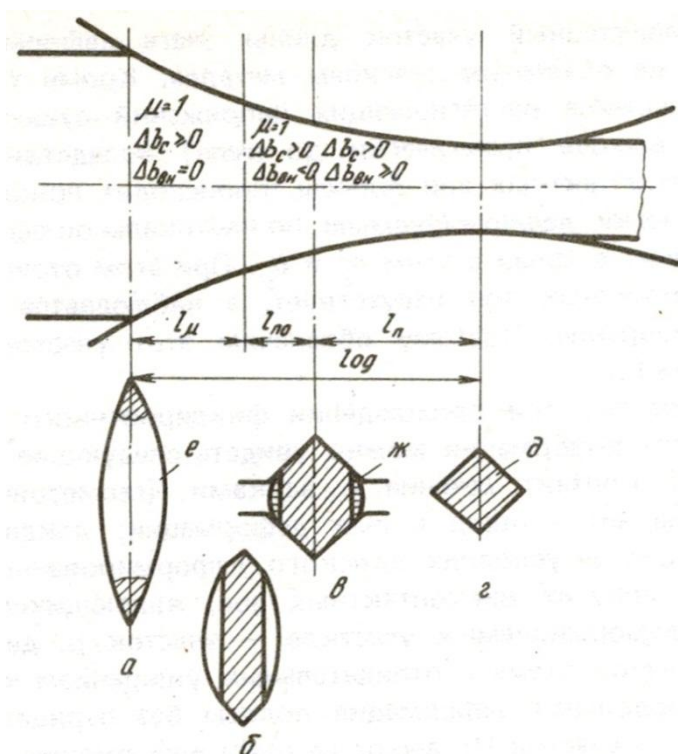


Рис. 1. Характерные участки деформации: а – плоскость входа; б – граница между зонами μ и ОП; в – граница между зонами ОП и П; г – сечение выхода из очага деформации; д – область поперечного сечения, пластически сжимаемая валками; е – боковые внеконтактные зоны в упругом состоянии; ж – боковая внеконтактная зона в пластическом состоянии

Применение указанной методологии в сочетании с традиционными эмпирическими подходами, а также использование квалиметрических оценок позволили в 80-х годах XX века решить целый класс задач, связанных с увеличением вытяжной способности калибров, освоением увеличенного сечения заготовок, снижением количества поверхностных дефектов и повышением уровня качества заготовок, сортового проката и катанки на заготовочных, сортовых и проволочном станках ММК, а также решить задачи повышения качества при производстве гнутых профилей. По итогам этих теоретических и практических результатов в конце 80-х–начале 90-х учеными-производственниками ММК (В.Ф.Рашников, К.Л.Радюкевич, Ф.М.Ахметзянов) и учеными МГМИ им. Г.И.Носова (Н.Г.Шемшурова, Л.М.Цун, И.Г.Шубин) были успешно защищены кандидатские диссертации, в то время существенно укрепившие теоретический и практический фундамент научной школы сортовой прокатки кафедры ОМД.

В это время позитивное влияние на развитие и эволюцию научной школы сортовой прокатки оказала научная школа квалиметрии и управления качеством под руководством Г.С.Гуна, также сформировавшаяся на кафедре ОМД. Взаимодействие этих школ дало синергетический эффект, обеспечив взаимодействие научных коллективов при комплексном решении задач управления технологией и качеством при сортовой прокатке [5].

Дальнейшая эволюция научной школы кафедры ОМД по исследованию и развитию процессов сортовой прокатки во многом определялась возможностями математического моделирования процессов деформации в калибрах с учетом технологических режимов прокатки и особенностей оборудования сортовых и проволочных станов.

Следует отметить, что одним из основных факторов моделирования сортовой прокатки является способ описания геометрических параметров формоизменения. С середины 90-х годов с развитием возможностей вычислительной техники за рубежом получило мощное развитие практическое применение метода конечных элементов в задачах расчета и анализа различных процессов деформации, прогнозирования параметров напряженно-деформированного со-

стояния, энергосиловых параметров при ОМД, в том числе и при сортовой прокатке [6].

Решение задач деформации в калибрах методом конечных элементов имеет важнейшее значение для всестороннего изучения процессов, протекающих в очаге деформации. Вместе с тем, целый ряд практических задач сортовой прокатки требует применения математических моделей совершенно другого характера. Задачей таких моделей при разработке и анализе калибровки валков, оценке возможностей оборудования, совершенствовании режимов прокатки, настройке станов является обеспечение быстрых и надежных решений при одновременном учете варьируемых технологических параметров.

Следует отметить, что для реализации таких подходов к моделированию и решению задач ОМД достаточно эффективным является аппарат матричной алгебры, который давно и плодотворно используется научными школами кафедры ОМД Магнитогорского государственного технического университета. В частности, уже около 50 лет на кафедре ОМД МГТУ успешно развивается матричный метод описания нагрузок и деформаций листопрокатных клеток кварто, у истоков которого стояли В.В.Мельцер [7], В.М.Салганик [8, 9] и их ученики. Данный метод позволяет использовать распределенные (матричные) характеристики силовых условий и деформаций по длине бочки валка и эффективно решать широкий класс задач, связанных с моделированием процессов формоизменения металла и деформации валковых систем при листовой прокатке. Кроме этого, используя аппарат матричной алгебры, ученые кафедры ОМД МГТУ внесли существенный вклад в методологию метода конечных элементов применительно к задачам обработки металлов давлением, представив и реализовав метод конечных элементов в матричном виде [10], что повысило компактность и наглядность записи основных зависимостей по сравнению с традиционно используемыми уравнениями.

Во второй половине 80-х годов аппарат матричной алгебры был применен учеными научной школы сортовой прокатки кафедры ОМД, что определило успешное развитие школы на долгие годы.

В.Н.Заверюха и С.А.Тулупов предложили векторное (матричное) описание контура калибра простой формы [11-13], а затем С.А.Тулупов при участии О.Н.Тулупова применил предложенный подход [14] для решения технологических задач формоизменения сортовых профилей, связанных с определением контура калибра простой формы и контура свободной поверхности металла в калибре. Следует отметить, что решения задач по расчету формоизменения в калибрах, полученные с применением данного метода, хорошо коррелируют с решениями, полученными С.А.Тулуповым и Е.Н.Чумаченко [15, 16] полуаналитическим методом конечных элементов, хотя быстродействие последнего при расчетах существенно ниже.

В кандидатской диссертации, представленной и защищенной О.Н.Тулуповым в 1993 году [17], показана возможность использования закономерностей конечномерных векторных пространств для разработки критериев оценки технологичности формоизменения металла в калибрах.

В 1995 г. в МИСиС С.А. Тулупов защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка моделей и алгоритмов расчета формоизменения при сортовой прокатке с целью проектирования новых и совершенствования действующих калибровок», которая стала первой докторской работой, закрепившей основы новых принципов моделирования и совершенствования процессов сортовой прокатки [18].

Развитие идей применения матричных методов к задачам сортопрокатного производства в период 1995-2003 гг. под руководством О.Н.Тулупова привело к дальнейшей эволюции научной школы, разрабатывающей математические модели технологических схем сортовой прокатки и их практические приложения на основе структурно-матричного подхода (рис. 2).

Согласно данному подходу, защищенному в 2001 году О.Н.Тулуповым в виде докторской диссертации [19], в матричном виде могут быть представлены не только процессы формоизменения, но и свойства прокатываемого металла, температурно-скоростные условия, характеристики деформирующего инструмента и другие технологические параметры [20-22]. Особенности представле-

ния информации при таком подходе позволили обеспечить достаточно высокую степень универсальности описания конечного формоизменения профилей различной сложности, возможность адаптировать математические модели к различным технологическим процессам сортовой прокатки, а также легко интегрировать в разрабатываемые прикладные модели элементы других известных математических моделей и методов.

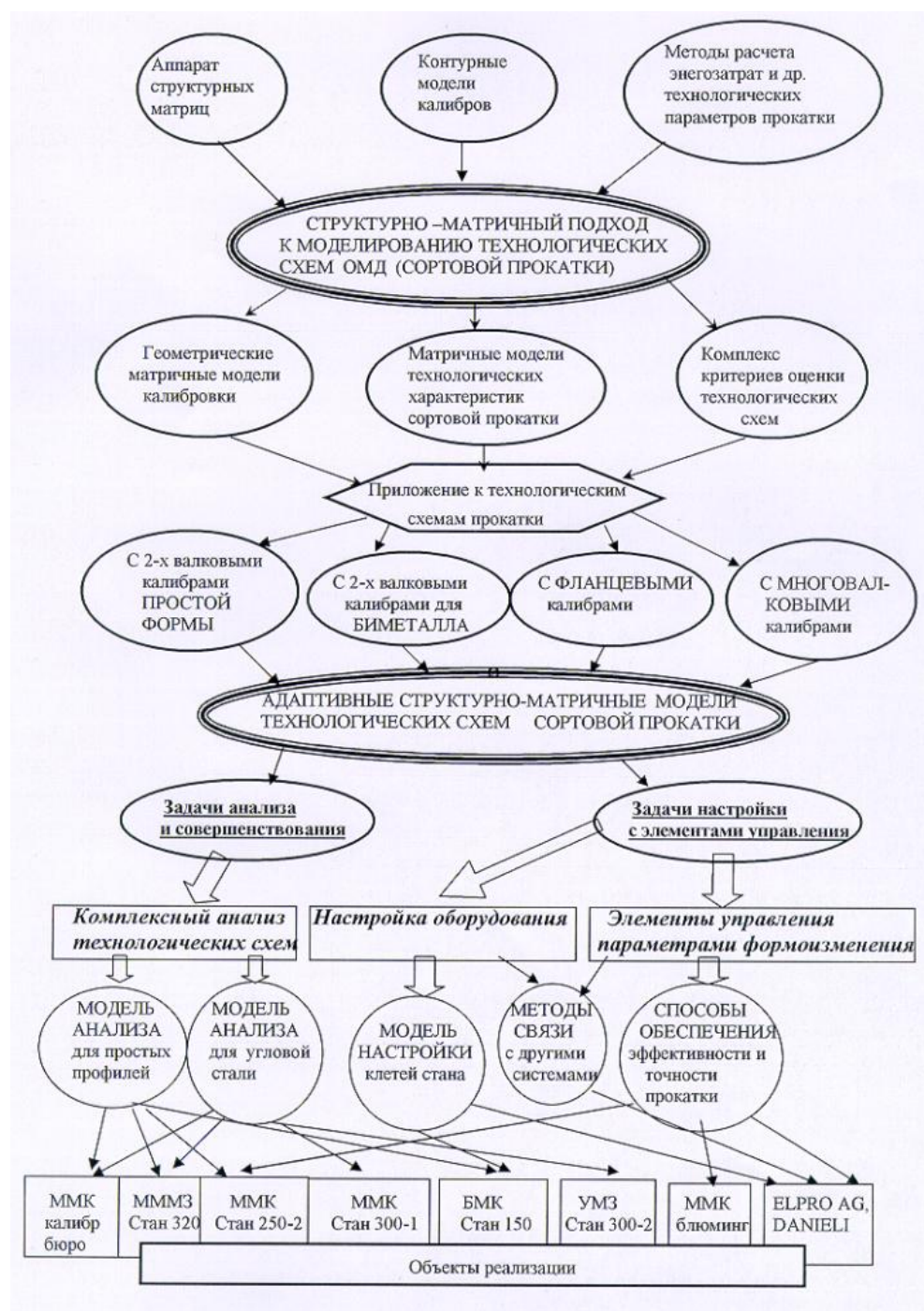


Рис. 2. Схема сортовой прокатки и их практические приложения на основе структурно-матричного подхода

Структурно-матричный подход позволяет достаточно легко адаптировать модели технологических схем к различному иерархическому уровню решаемых задач. При этом блочная структура матриц «сворачивается» и «разворачивается» в зависимости от значимости информации, необходимой для моделирования определенных процессов и решения определенного вида задач:

$$\begin{bmatrix} [C'_1] \\ [C'_2] \\ \vdots \\ [C'_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_1] & 3_{12} & \cdots & 3_{1m} \\ 3_{21} & [I_2] & \cdots & 3_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 3_{m1} & 3_{m2} & \cdots & [I_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [C_1] \\ [C_2] \\ \vdots \\ [C_m] \end{bmatrix},$$

где $[C_m]$ и $[C'_m]$ – матрица, описывающая начальное и конечное состояние одного из свойств объекта;

$[I_m]$ – матрица изменения состояния;

3 – зависимости между различными матрицами изменения (например, связь между формоизменением и температурой).

Для оценки эффективности технологических схем сортовой прокатки предложено использовать представление их в виде множества элементов конечномерного векторного пространства. При этом были применены свойства нормируемости и метризуемости пространства. Это позволило разработать универсальную систему матричных критериев для комплексного анализа калибровки валков для профилей любой сложности.

Решение многих технологических задач, связанных с повышением эффективности процессов сортовой прокатки, подробно описано в работе [20]. В работах [23, 24] представлены результаты разработки адаптивной структурно-матричной модели для решения задач настройки непрерывных групп клетей. Воздействие на формоизменение с возможностью управления станом предполагает объединение информации по всем основным показателям процесса, влияющим на размеры и качество получаемой формы (форму и размеры подката, температуру подката, марку стали, характеристики клетей, скорость прокат-

ки и т.д.). Все необходимые параметры записываются в сложную матрицу начального состояния $[A]$, при этом матрица может состоять из блоков, которые, в свою очередь, содержат структуры данных. Задача настройки с помощью изменения зазора между валками была решена в кандидатской диссертации А.Б.Моллера [25] в 1996 году путем нахождения неизвестных значений величины изменения зазора каждой клетки в матричном уравнении, записанном для клеток всего стана. Кроме этого, А.Б.Моллер впервые разработал матричную модель, описывающую изменение формы контура калибра при износе валков.

В процесс эволюции научной школы и развитие адаптивных структурно-матричных моделей вложил существенный вклад коллектив ученых, защитивших кандидатские диссертации под руководством О.Н.Тулупова и при научной консультации А.Б.Моллера.

Так, в 1996-97 гг. А.А.Зайцев разработал принципы матричного описания формоизменения сортовых профилей в калибрах различной сложности, а также при участии М.Ф.Сафронова адаптировал этот подход к описанию процесса формоизменения при производстве гнутых профилей. В 1997 году в диссертации А.А.Зайцева [26] был разработан структурно-матричный подход, позволяющий описать технологические параметры процесса прокатки единым матричным уравнением, а также была доказана связь между величинами матричного критерия технологичности и работы формоизменения. Структурно-матричный подход, предложенный и обоснованный для моделирования процессов прокатки и калибровки фасонных профилей, был использован при совершенствовании калибровки уголка на действующих в то время станах ОАО «ММК», в том числе для стабилизации геометрических размеров уголка в открытых калибрах.

Решение комплекса научных и практических задач высокоскоростного комплекса по производству катанки на примере проволочного стана 150 ОАО «БМК» было представлено в 1999 году в диссертации Е.А.Евтеева [27], в результате чего на основе использования структурно-матричного подхода были установлены режимы прокатки с пониженным теплосодержанием заготовок,

разработана методика учета и контроля натяжений в чистовом блоке, а также способы стабилизации точности подката за счет кинематического рассогласования скоростей прокатки и настройки калибров по длине раската.

В диссертации В.В.Арцибашева [28] в 2001 году было представлено матричное уравнение, описывающее кинематические характеристики формоизменения металла и движения профиля по длине очага деформации, а неравномерность формоизменения металла в калибрах определена компонентами девиаторной составляющей матрицы формоизменения и в результате оценена интегральными показателями, что позволило разработать методику совершенствования калибровки валков, обеспечивающую снижение неравномерности, и применить ее для решения задачи равномерного распределения медной оболочki вокруг стального сердечника при прокатке биметаллической катанки в условиях стана 320 ОАО «ММЗ».

Учет и моделирование формоизменения ликвационной зоны в непрерывнолитой заготовке представлены в 2001 году в диссертации А.А.Завьялова [29], где для геометрического структурно-матричного описания осевой ликвационной зоны в поперечном сечении раската предложен способ, основанный на линейной аппроксимации формы с разбиением ее на отдельные сегменты, а также критерии, характеризующие формоизменение ликвационной области и входящие в общую структуру описания процесса наряду с матрицей формоизменения. На основании предложенного способа создан программный продукт, в котором структурно-матричная модель технологической схемы была дополнена матричной моделью формоизменения ликвационной зоны [29]. При помощи компьютерного моделирования были сформулированы рациональные рекомендации по режимам прокатки для условий сортопрокатного передела ОАО «ММК» с учетом планировавшейся в то время реконструкции предприятия, а также определено рациональное сечение заготовки.

Применяя информативность и системность структурно-матричного подхода к описанию геометрических параметров очага деформации, Д.И.Кинзин в 2003 году представил и защитил кандидатскую диссертацию [30], в которой на

основе использования принципа наименьшего сопротивления получены новые методики расчета показателей формоизменения при прокатке в калибрах и полях контактных напряжений. Разработка данных методик дала новый импульс развитию практических приложений для расчета и анализа калибровки валков в условиях калибровочного бюро, а также для решения задач оптимизации калибров по различным критериям, что нашло отражение и развитие в новых работах научной школы вплоть до 2014 года. Это связано с коренной реконструкцией сортового производства ОАО «ММК» и необходимостью структурирования и сохранения наработанного на старых станах опыта (эффективно действующих калибровок профилей), а также анализа и корректировки новых режимов прокатки для вновь строящихся прокатных станов 170, 370 и 450. Это привело к сокращению сроков и материальных затрат при переносе и освоении сортамента со старых станов на современные станы фирмы Danieli.

В развитие идеологии структурно-матричного моделирования (структурирование параметров технологического процесса в виде блоков матрицы и определение связей между ними) в диссертации А.В.Логинова в 2004 году [31] была предложена запись матричного блока, отражающая связь между технологическими параметрами термомеханически упрочненного проката и уровнем механических свойств, что позволило установить и использовать при производстве арматуры в сортовом цехе ОАО «ММК» математические зависимости между прочностными характеристиками термомеханически упрочненного проката, углеродным эквивалентом и технологическими параметрами прокатки и охлаждения, а также определить интервал температур, в котором охлаждение при прокатке оказывает влияние на прочностные характеристики, не ухудшая геометрических параметров раската.

Использование структурно-матричного подхода нашло отражение в диссертации Д.В.Колясова [32] и работах его соавторов в начале 2000-х при освоении и непродолжительной эксплуатации в условиях ОАО «ММК» стана фирмы «KOCKS» с трехвалковыми калибрами и характерной спецификой эксплуатации дорогостоящих прокатных валков с регламентированным их перемещением

по прокатному стану. Это способствовало доработке модели непрерывного стана до «сквозного» расчета всей калибровки как в двух-, так и в трехвалковых калибрах для комплексного расчета геометрических и энергосиловых параметров прокатки, а также реализации принципа описания и учета состояния валковых шайб в блоках трехвалковых калибров как основного критерия оценки дальнейшей пригодности шайбы в занимаемой позиции [33].

Вообще с середины 1990-х – до начала 2000-х гг. при помощи данного подхода был получен комплекс технических и технологических решений и результатов, основными из которых являются следующие:

- разработан и реализован на проволочном стане 250-2 ОАО «ММК» способ стабилизации геометрических размеров катанки по длине бунта путем дифференцированного охлаждения;
- разработана, промышленно опробована и внедрена на стане 320 цеха биметалла ОАО «ММЗ» калибровка валков чистовой группы, повышающая равномерность формоизменения при прокатке сталемедной катанки;
- разработаны и внедрены в практику работы калибровочного бюро ОАО «ММК» программные средства и методики анализа калибровок валков и технологических схем сортовой прокатки; пакет программ для расчета, анализа и совершенствования калибровки станов 300-1, 500, 250-1, 250-2, 300-3;
- разработаны и переданы с целью дальнейшего совместного использования фирмам Elpro AG (Германия) и Danieli (Италия) элементы математической модели и программного обеспечения для внедрения на действующих и вновь строящихся станах и для использования при анализе технологических схем;
- реализованы в условиях проволочного стана 150 ОАО «БМК» (г.Белорецк) компьютерная система-советчик для настройки непрерывных промежуточных групп стана и способ дифференцированной настройки для повышения стабильности размеров подката перед блоком, получены новые рекомендации по настройке;

– на основании моделирования режимов прокатки блюминга и НЗС 630/530 в обжимном цехе ОАО ММК предложены и экспериментально опробованы способ и калибровка для прокатки сляба с разделением и последующим получением сортовой заготовки.

Многолетнее успешное развитие научной школы было бы невозможно без тесного взаимодействия, постоянного научно-технического и методологического сотрудничества с крупнейшими специалистами в области технологии сортовой прокатки и моделирования процессов пластической деформации В.Г.Шеркуновым, В.А.Шиловым, А.А.Богатовым, А.И.Трайно, В.С.Юсуповым, В.А.Трусовым, О.М.Смирновым, Н.А.Чиченевым и другими коллегами.

Одной из основ существования и развития научной школы «Моделирование и развитие процессов сортовой прокатки» традиционно является постоянная связь и активное взаимодействие с коллегами из сортопрокатного производства ММК, а также других предприятий.

В развитие научной школы с начала 1990-х серьезный вклад внесли крупные специалисты-производственники В.Ф.Рашников, М.Ф.Сафронов, В.Г.Логинов, А.В.Титов, А.М.Алексеев, О.П.Ширяев (ОАО «ММК»), А.Н.Луценко, В.А.Монид (ОАО «Северсталь»), Е.А.Евтеев (ОАО «БМК»), а также многие технические специалисты сортовых и проволочных станов.

Особое место в расширении и эволюции научной школы всегда занимало и занимает взаимодействие с калибровочным бюро ОАО «ММК». Главные калибровщики П.В.Ширяев, В.Г.Логинов, а также такие маститые специалисты, как Р.Г.Загитов, В.М.Куприн, В.А.Авдонин и другие калибровщики всегда были участниками научной школы, а Д.И.Кинзин до начала работы над докторской диссертацией в течение семи лет работал в калибровочном бюро, внедряя структурно-матричный подход в практику в период коренной модернизации сортопрокатного передела ММК.

Сегодня калибровочное бюро ММК под руководством В.А.Шурыгина, продолжая многолетние традиции, активно и профессионально участвует в раз-

работке, опробовании и внедрении новых программных средств оптимизации калибровок, являясь частью интеллектуального потенциала научной школы.

Особой частью и продолжением научной школы на производстве по традиции являлись и являются руководители и специалисты сортовой лаборатории ЦЛК и сортового цеха ОАО «ММК» (Ю.В.Симаков, А.Ю.Дзюба, Д.В.Назаров, Р.В.Новицкий, Т.А.Мурзабаев и др.).

Взаимодействие с производственной частью научной школы является определяющим фактором актуальности и результативности проводимых научных исследований и позволяет наметить оптимальные векторы развития ее научно-технического потенциала. Характерными примерами являются выполненные в середине 2000-х гг. научные работы Ю.В.Симакова (ОАО «ММК») и А.Н.Луценко (ОАО «Северсталь»), представленные и защищенные в качестве диссертаций под руководством А.Б.Моллера и О.Н.Тулупова соответственно. В диссертации Ю.В.Симакова [34] определено количественное совместное влияние температуры, скорости и степени деформации на формирование структуры металла при высокоскоростной прокатке катанки и построена математическая модель прогнозирования уровня механических свойств как целевого показателя качества в зависимости от режима прокатки и охлаждения катанки. Диссертационная работа А.Н.Луценко [35] решила задачи совершенствования процессов деформации непрерывнолитой заготовки в калибрах на основе матричной модели формоизменения с целью повышения качества сортового проката.

Оба научных исследования показали растущую актуальность разработки, исследования, апробации и использования технологических методов управления качественными показателями продукции и необходимость развития и эволюционирования методологии научной школы в направлении системной постановки и решения большого класса задач управления качеством.

Технологические методы управления качеством сортового проката были представлены и защищены в одной из первых кандидатских работ по специальности «Стандартизация и управление качеством продукции (металлургия)» Д.Н.Тулуповым в 2004 г. под руководством В.М.Салганика. В этой работе [36]

с использованием эффективных методов оценки качества установлено приоритетное значение фактора межклетевого натяжения с точки зрения воздействия на показатели качества катанки по геометрическим размерам непосредственно в процессе прокатки, на основе экспериментальных исследований выявлена связь между характером влияния на точность раската равноосных и неравноосных калибров и разработаны инструменты управления качеством с использованием натяжения как управляющего фактора для повышения точности поперечного размера раската по длине.

Поэтому с 2003 года с появлением на кафедре ОМД новой специальности «Стандартизация и сертификация в металлургии» в научной школе «Моделирование и развитие процессов сортовой прокатки» выделилось и успешно развивается под руководством А.Б.Моллера научное направление «Повышение эффективности производства сортопрокатной продукции на основе структурирования и развития элементов менеджмента качества», включая взаимную увязку проблем управления качеством продукции, качеством технологического процесса и качеством подготовки и повышения квалификации персонала.

Эволюция научной школы в направлении проблем управления качеством определяется следующими группами факторов:

1. Уровень развития процессов производства сортового проката в направлении гибких высокоскоростных технологических схем при одновременном ужесточении требований к показателям качества профилей актуализировал вопросы поиска эффективных и результативных методов целенаправленного управления качеством продукции через воздействие на технологические факторы процесса, организацию труда и компетенции персонала.

2. Современные тенденции управления производством базируются на развитии организационных и методических основ стандартизации и управления качеством, применении адаптивных систем управления технологическими процессами и все более широко внедряемой системы менеджмента качества на основе международных стандартов ISO серии 9000.

3. Опыт металлургических предприятий показал эффективность применения достаточно простых, универсальных, быстродействующих, легко дополняемых и надежных моделей, отвечающих требованиям объектно-ориентированного математического обеспечения, реализованного для работы как в режиме ON LINE, так и в режиме моделей-имитаторов, оставляющих право принятия решения по управляющему воздействию за оператором технологического участка. Следует учитывать, что такие модели также являются эффективным инструментом повышения компетенций производственного персонала и, как следствие, результативности его работы. Вместе с тем, неоднозначная связь технологических параметров прокатки в калибрах различной сложности и небольшие возможности заочного тренинга молодых специалистов ограничивают разработку, внедрение и эффективное использование комплексных систем управления качеством продукции сортопрокатных станов. Применяемые в настоящее время системы характеризуются использованием типовых форм калибров, типовых вариантов изменения технологических параметров, включая режимы натяжения раската между клетями. Кроме того, затруднен мониторинг показателей качества продукции от стадии проектирования до непосредственного производства ввиду отсутствия единства математических подходов к описанию сортовых профилей, с одной стороны, и к методологии управления качеством сортового проката различных типоразмеров, с другой. Данное обстоятельство усложняется часто возникающей необходимостью изменения проектно-компоновочных решений для сортовых станов в процессе их модернизации или строительства, что подчеркивает важность развития и применения адаптивных комплексных моделей управления качеством, решающих вопросы как системного, так и оперативного анализа альтернативных вариантов технологических схем.

Поэтому с середины 2000-х гг. разработка и совершенствование методов сквозного интегрированного и адаптивного управления качеством сортового проката на единой математической основе и единых принципах представления информации о критериях качества стала одним из приоритетных направлений

дальнейшего развития сортопрокатной научной школы кафедры ОМД МГТУ им. Г.И. Носова.

В эволюционирование научной школы в этом направлении вложил существенный вклад коллектив ученых, защитивших кандидатские диссертации под руководством А.Б.Моллера (С.А.Левандовский, Н.А.Ручинская, Д.В.Назаров, А.С.Лимарев) и О.Н.Тулупова (А.В.Наливайко).

Научная работа С.А.Левандовского [37] в 2005-2006 гг. решила задачу оперативного управления в рамках структурно-матричного подхода большим объемом технологических параметров, в связи с чем была разработана математическая модель для целенаправленного повышения параметров качества продукции путём оптимизации формы калибров по неравномерности деформации при прокатке круглого и квадратного профилей и соответствующая иерархическая база данных технологических параметров [38]. Задача сводилась к отысканию изменений величин радиус-векторов, характеризующих контур калибра, уменьшающих значение коэффициента неравномерности деформации $K_{нер}$ до значения менее 0,25, а, значит, и саму неравномерность деформации раската при заданных условиях.

В рамках структурно-матричного подхода с применением принципа критериального подхода к управлению качеством Н.А.Ручинской в 2006-2008 гг. был разработан комплекс новых показателей точности прокатываемого профиля [39, 40]: распределенное отклонение профиля (РОП) поперечного сечения раската, отклонение, выраженное одним числом, – интегральное отклонение профиля (ИОП) и показатель соответствия профиля (ПСП) логического типа, отражающий соответствие отклонения допустимому диапазону. На базе разработанных показателей РОП, ИОП и ПСП по оригинальной методике для каждого профилеразмера определяются допустимые пределы варьирования температуры нагрева заготовки, предела текучести стали, количество переточек, которые не требуют предупреждающих действий (настройки клеток стана), а также диапазоны изменения основных параметров прокатки, позволяющие скоррек-

тировать качество проката путем целенаправленного изменения межвалкового зазора как основного инструмента управления.

Научные и практические результаты, полученные в 2006-2009 гг. Д.В.Назаровым [41], базируются на адаптивности структурно-матричного подхода и позволяют повысить точность и однозначность матричного определения точек пересечения базисных радиус-векторов с контуром калибра путем вынесения центра описания контура калибра из плоскости самого сечения. Наибольшее значение такое решение имеет при работе со сложными фланцевыми профилями при предварительной диагностике и формировании корректирующих мероприятий. Первый вариант заключается в оценке распределения значений метрик и определении тех клеток стана, в которых наблюдается высокий момент прокатки. Второй вариант является развитием первого. К модели оценки распределения нагрузки добавляется корректировка формы калибров в критически нагруженных клетях. Так, при совершенствовании калибровки швеллера №16 для стана «450» ОАО «ММК» по предложенной методике была получена новая калибровка чистовой группы клеток, позволившая снизить температуру нагрева в печи на 30°C и обеспечить температуру конца прокатки в диапазоне 910-980°C, что в свою очередь обеспечило класс прочности 345 Н/мм² при прокатке швеллера №16 из стали марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89.

В работах А.С.Лимарева [40, 42, 43] в 2006-2009 гг. впервые представлена комбинация технологических методов управления качеством и компетентностных моделей. Были разработаны:

- методика управления качеством производства фасонных профилей, способствующая снижению усилий прокатки за счет рационального подбора элементов калибров, основанного на дискретном представлении их контуров;
- элемент управления качеством сортовой продукции на основе формирования компетенций персонала с применением адаптивных матричных моделей настройки станов;

– методика оценки квалификации технологического персонала металлургического предприятия на основе нового комплексного показателя, отвечающего требованиям к системам менеджмента качества.

В итоге в 2011 году в докторской диссертации А.Б.Моллера [44] представлена суть методологии, отвечающей принципу сквозного интегрированного управления качеством сортопрокатных технологических систем на единой математической основе структурно-матричного подхода представления информации, ее систематизации и применения в комплексе взаимосвязанных математических моделей. Это может быть представлено в виде упрощенной схемы (рис. 3) [40, 43].

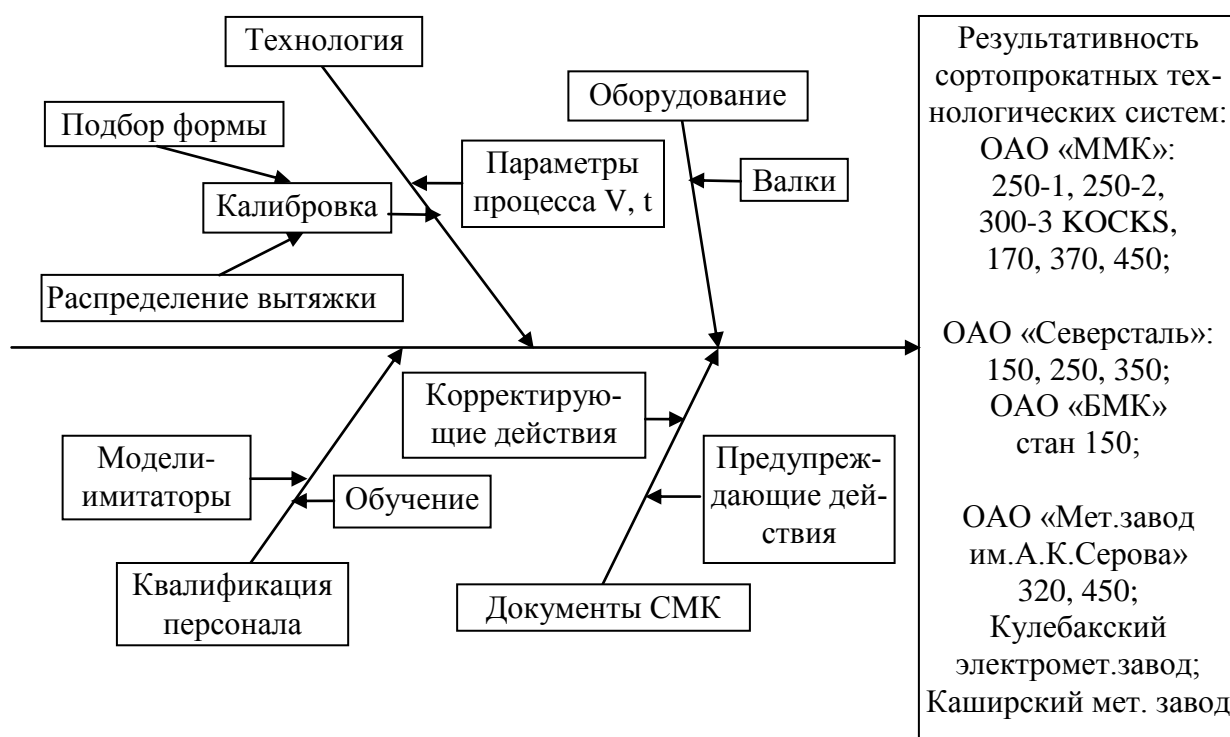


Рис. 3. Суть методологии, представленная фрагментом диаграммы «причина-следствие»

Равноценным принципом TQM по сравнению с процессным подходом является вовлечение сотрудников. Сотрудники, вовлекаемые в процесс реализации целей организации, должны иметь соответствующую квалификацию для выполнения возложенных на них обязанностей. Модель управления качеством сортопрокатной продукции (рис. 4) содержит целый ряд разделов, обеспечи-

вающих комплексное сквозное моделирование процесса прокатки на сортовом стане с учетом уровня техники, технологии и компетентности персонала.

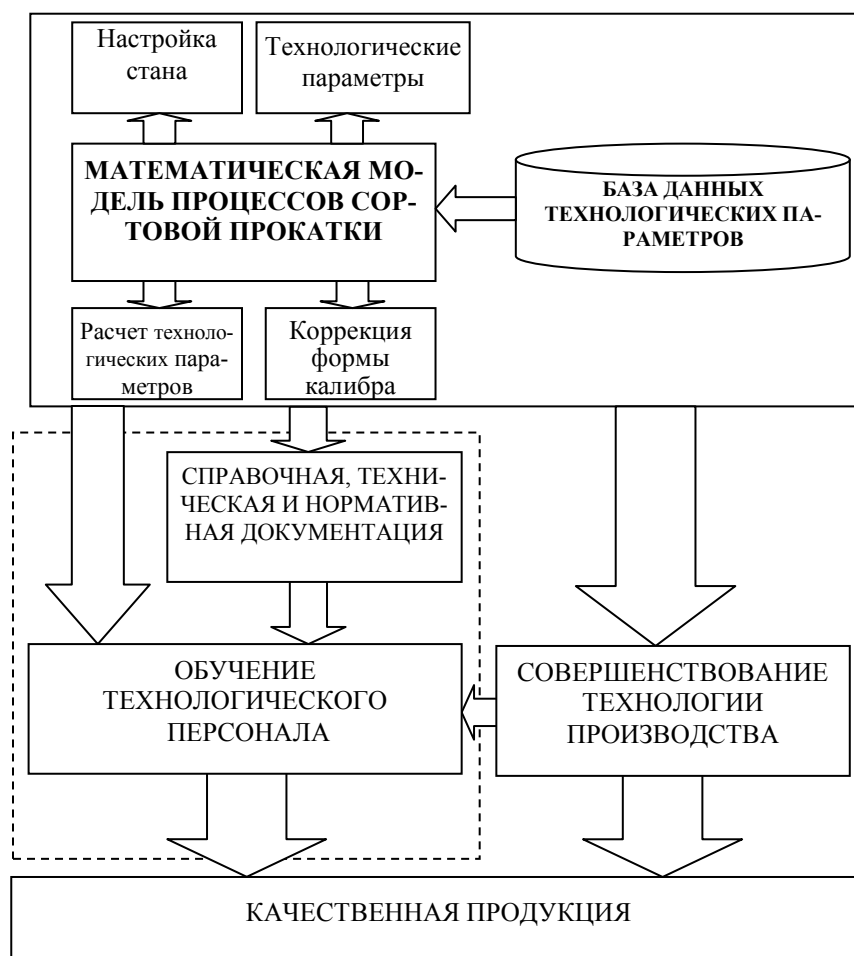


Рис.4. Модель управления качеством сортопрокатной продукции

Разработанная модель управления качеством сортопрокатной продукции, снабженная блоками расчета, информации, обучения и проверки знаний, позволяет решать следующие задачи менеджмента качества [43]:

- повышение качества выпускаемой продукции и эффективности производства;
- сокращение сроков качественного обучения операторов, вальцовщиков, калибровщиков и инженерно-технологического персонала сортового стана;
- повышение профессионального уровня и технологической дисциплины действующего эксплуатационно-технологического персонала цеха;
- обеспечение необходимой профессиональной базы и быстрой переподготовки кадров внутри цеха и предприятия;

- получение объективных оценок квалификации и профессиональных возможностей для повышения разряда, поощрения и перераспределения кадров на предприятии;
- накопление и передача производственного опыта.

В дальнейшем А.Б.Моллером и А.С.Лимаревым [45] на основе компетентностного подхода разработан комплексный показатель уровня квалификации технологического персонала, отображающий базовые компетенции, образование, опыт, мастерство, лидерские навыки, творческую активность и базовые компетенции. Разработана организационная структура функционирования модели-имитатора прокатки на сортопрокатном стане. На основании структуры модели и созданного математического аппарата был разработан программный комплекс «Стан 170», включающий элементы управления нормируемыми показателями качества, путем определения влияния на названные показатели основных технологических факторов, что позволяет выявить и предотвратить нарушения качества производимых работ. В качестве ПД согласно структуре модели формирования компетенций программный комплекс содержит встроенный электронный учебник и систему тестирования, контролирующую качество обучения и овладения навыками безаварийной и качественной работы, что и является целью СМК. Программный комплекс «Стан 170» активно используется на ОАО «ММК» и в ФГБОУ ВПО «МГТУ», в том числе в многопрофильном колледже (МпК) с целью повышения уровня компетенций специалистов и руководителей сортового цеха и смежных с ним производственных подразделений. Свыше 300 слушателей, прошедших обучение, получили свидетельства о высоком уровне знаний и умений по планированию проектирования и разработки (СТО СМК 2-7.3-03-2010) и обеспечению выпуска качественной продукции.

Созданный комплекс моделей и методики их применения, а именно: новые показатели качества процесса прокатки, методика оценки и повышения компетенций технологического персонала и методология управления качеством продукции на стадиях проектирования, внедрения, производства и совершенствования технологических схем прокатки сортовых профилей - обладают потен-

циалом получения синергетического эффекта в области повышения качества. Это позволяет в рамках тенденций развития современного менеджмента – «рачительное производство» (Lean Production), реинжиниринг-процесс и развитие информационных технологий – формировать стратегию предприятия по обеспечению качества путем расширения внедрения моделей-имитаторов. Они должны основываться на едином подходе построения модели управления качеством процесса производства и модели, формирующей компетенции персонала, обладать возможностью поиска «быстрых» нетиповых решений и их реализации без снижения уровня качества продукции.

Следует отметить, что в рамках научной школы «Моделирование и развитие процессов сортовой прокатки» имеется опыт решения современных задач управления качеством продукции сортовых станков с использованием квалиметрического подхода и регрессионных моделей. Так, задачи достижения заданного уровня показателей качества проката на примере арматуры для разработки нормативного документа, упрощающего отгрузку продукции потребителю, были решены в 2009-2011 гг. в научной работе А.В.Наливайко [46] на основе предложенной им структуры комплексного показателя качества термоупрочнённого арматурного проката, отличающегося применением новых, специфичных для арматуры А500С дифференциальных показателей [47]. При этом была получена регрессионная модель для прогнозирования показателей качества арматуры, а при оценке дифференциальных показателей качества арматуры в регрессионной модели использованы уравнения для расчета изменения дисперсии прочностных и пластических свойств готового проката. Результаты работы были внедрены в условиях ГУП «ЛПЗ» (г.Ярцево).

Эволюция и расширение методологического арсенала научной школы для решения задач сортовой прокатки связаны с актуализацией после кризиса 2008 года проблемы снижения расхода энергоносителей в технологических процессах. Поэтому в защищенной в 2013 году под руководством Д.И.Кинзина и при консультации С.А.Левандовского диссертационной работе О.Б.Калугиной [48] на основе структурно-матричного представления очага деформации разработа-

на модель и решена задача оптимизации для определения формы контуров калибров, обеспечивающей снижение энергозатрат при прокатке. В результате численного решения задачи оптимизации формы калибров выявлено, что система вытяжных калибров, обеспечивающая минимум работы деформации, должна содержать нечетные (неравноосные) калибры с плоским дном и выпуклой боковой стенкой. Кроме этого была установлена взаимосвязь между коэффициентом эффективности калибровки и равномерностью распределения коэффициента вытяжки по клетям стана.

Рассмотренные пути применения структурно-матричного подхода для моделирования процессов сортовой прокатки и его приложений к различным ранее перечисленным задачам показывают, что данный подход достаточно легко адаптируется к различным уровням технологических задач, позволяет вводить в структуру модели новые данные и устанавливать новые связи между технологическими параметрами и решать в том числе актуальные задачи по прослеживаемости производства и формирования потребительских свойств продукции [47]. Кроме этого, данный подход открыт для интегрирования с другими эффективными моделями, в частности, с моделями, описывающими фазовые и структурные превращения в сталях при деформации. Этим и определяются основные направления дальнейшего развития матричных методов в решении самого широкого спектра теоретических и технологических задач прокатки и управления качеством сортовых профилей и катанки.

Достижения научной школы сортовой прокатки кафедры ОМД были отмечены на государственном уровне. За разработку научных основ и практических приложений адаптивных структурно-матричных моделей для повышения эффективности процессов сортовой прокатки коллектив молодых ученых (Завьялов А.А., Кинзин Д.И., Логинов А.В., Левандовский С.А.) под руководством О.Н. Тулупова был удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники за 2006 год.

Полученные и разрабатываемые научной школой сортовой прокатки кафедры ОМД решения используют преемственность и адаптивность применяе-

мого математического аппарата и основных принципов его построения как при решении технико-технологических задач, так и задач в области управления качеством продукции. Это позволяет адаптировать и применять структурно-матричные модели и их приложения в смежных технических областях и открывает широкие возможности дальнейшей эволюции данного методологического подхода.

Библиографический список

1. Бахтинов В.Б. Технология прокатного производства. Учебник для техникумов. М.: Металлургия, 1983. 488 с.
2. Диомидов Б.Б., Литовченко Н.В. Технология прокатного производства. М.: Металлургия, 1979. 488 с.
3. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в много-валковых калибрах. М.: Металлургия, 1979. 240 с.
4. Тулупов С.А., Курдюмова В.А. Расчет средних коэффициентов при прокатке в вытяжных системах калибров // Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. №11. С. 63-65.
5. Эффективность деформации сортовых профилей / С.А.Тулупов, Г.С.Гун, В.Д.Онискив, В.А.Курдюмова, К.Л.Радюкевич. М: Металлургия, 1990. 280 с.
6. Finite element modeling of shape rolling of complex shaped parts – a steady state approach / Т.Н.Ким, Н.Д.Ким, С.М.Хванг // Modelling of Metal Rolling Processes 3. Conference Papers. IOM, Chameleon Press Ltd, London, 1999. P. 98-103.
7. Мельцер В.В., Пышенков И.А. Матричный метод расчета профилирования валков станов кварто // Известия вузов. Черная металлургия. 1965. № 10. С. 94-100.

8. Мельцер В.В., Салганик В.М. Матричный метод расчета деформации и профилировки валков листопрокатных клетей кварто: уч. пособие. Магнитогорск: МГМИ, 1970. 50 с.

9. Салганик В.М. Оценка погрешности матричного метода расчета деформаций валков клетей кварто и выбор подходящих аппроксимирующих функций // Теория и технология прокатки: Межвуз. сб. науч. тр. Свердловск: изд. УПИ, 1972. Вып. 196. С. 117-121.

10. Заверюха В.Н., Салганик В.М., Румянцев М.И. Решение задач теории пластичности методом тонких сечений и методом конечных элементов: Уч. пособие. Свердловск: Изд. УПИ, 1986. 58 с.

11. Тулупов С.А., Заверюха В.Н. Матричный способ представления профилей и формоизменения металла в процессах обработки металлов давлением // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. № 9. С. 62-65.

12. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения металла при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. № 12. С. 63-65.

13. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения металла при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 2. С. 48-50.

14. Тулупов О.Н., Тулупов С.А. Разработка критериев технологичности на базе векторного представления формоизменения металла в вытяжных калибрах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1994. № 1. С. 39-42.

15. Тулупов С.А., Чумаченко Е.Н., Машкова Н.Н. Об одном алгоритме приближенного анализа объемного течения металла при прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 1994. № 11. С. 26-27.

16. Применение конечно-элементного анализа к процессу прокатки в калибрах / Е.Н.Чумаченко, Н.Н.Машкова, С.А.Тулупов и др. // Вестник машиностроения. 1998. № 3. С. 556-563.

17. Тулупов О.Н. Анализ и совершенствование систем вытяжных калибров сортовых станов на базе векторно-матричной модели формоизменения: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1993. 153 с.
18. Тулупов С.А. Разработка моделей и алгоритмов расчета формоизменения при сортовой прокатке с целью проектирования новых и совершенствования действующих калибровок: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИСиС, 1995. 320 с.
19. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: Дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 404 с.
20. Тулупов О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки. Магнитогорск: МГТУ, 2002.
21. Tulupov O.N., Rashnikov S.F. Matrix mathematical modelling of roll pass design // Modelling of Metal Rolling Processes 3. Conference Papers. IOM. Chameleon Press Ltd. London. 1999. P. 458-467.
22. Стабильность формоизменения при прокатке стальной и сталемедной катанки / С.Ф.Рашников, О.Н.Тулупов О.Н., Логинов В.Г. и др. Магнитогорск: ПМП МиниТип, 1998. 106 с.
23. Адаптивные матричные модели настройки сортовых станов / О.Н.Тулупов, В.Ф.Рашников, С.А.Тулупов, Е.А.Евтеев. Магнитогорск: ПМП МиниТип, 1997. 92 с.
24. Методы применения математической модели настройки непрерывных сортовых станов / О.Н.Тулупов, А.Б.Моллер, А.А.Зайцев и др. // Производство проката. 1999. № 5. С. 7-12.
25. Моллер А.Б. Адаптируемая матричная модель для повышения точности непрерывной сортовой прокатки: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1996. 158 с.

26. Зайцев А.А. Анализ и совершенствование схем калибровки равнополочной угловой стали на основе матричных моделей формоизменения: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1997. 150 с.

27. Евтеев Е.А. Совершенствование технологии прокатки катанки с использованием адаптивных моделей: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1999.

28. Арцибашев В.В. Совершенствование систем калибров на основе структурно-матричного подхода для снижения неравномерности формоизменения при сортовой прокатке: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2001. 157 с.

29. Завьялов А.А. Улучшение качества сортового проката путем определения рациональных размеров непрерывнолитой заготовки, уменьшающих влияние дефектов ликвационного происхождения: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2001. 138 с.

30. Кинзин Д.И. Совершенствование и проектирование калибровок простых сортовых профилей на основе анализа показателей формоизменения и энергосиловых параметров: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. 124 с.

31. Логинов А.В. Совершенствование процесса термомеханического упрочнения при прокатке арматурных профилей с применением структурно-матричного моделирования: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2004. 118 с.

32. Колясов Д.В. Исследование технологических режимов прокатки катанки с целью расширения сортамента: Дис. ... канд. техн. наук. М.: 2006. 106 с.

33. Моделирование технологических возможностей стана 300-3 ОАО «ММК» и рационального использования валковых шайб при прокатке катанки из широкого марочного сортамента сталей / О.Н.Тулупов, А.Б.Моллер, Д.И.Кинзин, Д.В.Колясов, А.А.Завьялов, Ю.В.Симаков // Моделирование и развитие процессов ОМД: межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 208-213.

34. Симаков Ю.В. Исследование и совершенствование прокатки катанки из высокоуглеродистой стали 70 корд и низкоуглеродистой стали Ст1кп с целью повышения комплекса механических свойств: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 153 с.

35. Луценко А. Н. Совершенствование процессов деформации непрерывно-литой заготовки в калибрах на основе матричной модели формоизменения с целью повышения качества сортового проката: Дис ... канд. техн. наук. Череповец, 2006. 119 с.

36. Тулупов Д.Н. Повышение качества стальной катанки на основе моделирования и совершенствования технологии прокатки с натяжением: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 129 с.

37. Левандовский С.А. Повышение результативности сортовых станов путем совершенствования модели управления качеством на стадиях проектирования технологии и производства продукции: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 150 с.

38. Разработка баз данных калибровки и технологических режимов для эффективной модернизации сортопрокатного производства / Б.А.Никифоров, О.Н.Тулупов, А.Б.Моллер, С.А.Левандовский, В.Г.Логинов, А.В.Гасилин, Ю.В.Симаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 4. С. 53-58.

39. Ручинская Н.А. Повышение результативности сортовой прокатки на основе применения предупреждающих действий при настройке стана: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2008. 102 с.

40. Совершенствование сортопрокатных технологических систем через развитие элементов менеджмента качества / А.Б.Моллер, С.А.Левандовский, Н.А.Ручинская, А.С.Лимарев, Ю.В.Симаков, А.В.Логинов, Д.В.Назаров, Д.В.Колясов // Труды восьмого конгресса прокатчиков: Магнитогорск 11-15 октября 2010 г. Т1. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. С. 224-229.

41. Назаров Д.В. Совершенствование технологии прокатки для повышения эксплуатационных свойств швеллеров: Дис. ... канд. техн. наук Магнитогорск: МГТУ, 2009. 134 с.

42. Моллер А.Б. Повышение эффективности сортопрокатных технологических систем на основе структурирования и развития элементов менеджмента качества // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 7. С. 6-9.

43. Моллер А.Б., Лимарев А.С., Логинова И.В. Квалиметрическая оценка компетентности персонала металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2011. №1. С. 54-58.

44. Моллер А.Б. Методология управления качеством сортопрокатной системе на основе адаптивных моделей формирования потребительских свойств продукции: Дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2011. 285 с.

45. Лимарев А.С. Повышение эффективности производства сортового проката на основе управления качеством продукции и компетентностью технологического персонала: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 113 с.

46. Наливайко А.В. Повышение качества арматурного проката в условиях металлургического мини-завода на основе комплексного показателя: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2011. 145 с.

47. Матричный подход для решения задач прослеживаемости производства и формирования потребительских свойств сортопрокатной продукции / Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Левандовский С.А., Ручинская Н.А., Наливайко А.В., Рычков С.С. // Неделя металлов в Москве: Сб. трудов Всероссийской науч.-техн. конф. – М., 2013. - С. 504-511.

48. Калугина О.Б. Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию эффективности деформации с целью энергосбережения: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2013. 127 с.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВКИ ПОД ВОЛОЧЕНИЕ

В статье представлены направления повышения эффективности производства проволоки на основе совершенствования методики проектирования калибровки валков для прокатки заготовки под волочение. На основе результатов исследований, полученных с использованием средств компьютерного моделирования методом конечных элементов в среде Deform-3D, сформулированы рекомендации проектирования режимов деформации и применения систем калибров при горячей прокатке катанки и холодной прокатке передельной проволоки.

Ключевые слова: калибровка валков, напряженно-деформированное состояние, растягивающие напряжения, прокатка-прессование, сдвиговая деформация

Свойства стальной проволоки и эффективность ее производства во многом зависят от свойств и «степени технологической готовности» исходной заготовки под волочение – катанки, к которой предъявляются высокие требования по микроструктуре, механическим свойствам, точности геометрических размеров и другим показателям. Катанку производят на специализированных непрерывных проволочных станах горячей прокатки. Прокатка в чистовых проходах может осуществляться как в двух-, так и в многовалковых клетях. Минимальный диаметр катанки, получаемой горячей прокаткой, составляет 5 мм. Дальнейшая ее переработка до готовой проволоки осуществляется холодной деформацией. В массовом производстве основным способом изготовления проволоки является волочение в монолитных волоках. Волочение, как способ ОМД, имеет

недостатки, связанные с неблагоприятной схемой напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, что существенно ограничивает возможности холодного деформирования, поэтому технологический процесс производства проволоки, как правило, включает два и более передела, разделенных операциями термообработки, необходимыми для восстановления пластичности металла.

Для повышения эффективности производства передельной проволоки и проволоки больших диаметров рациональным решением может стать замена способа волочения в монолитных волокнах на холодную (теплую) прокатку. Для этого могут быть применены компактные двух- или многовалковые прокатные станы модульного типа. Способ холодной прокатки проволоки в нашей стране и за рубежом осваивали с 50-х по 80-е годы прошлого века. Прокатка по сравнению с волочением обеспечивает более благоприятную схему напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, снимает ограничения, связанные с контактными условиями и прочностью переднего конца заготовки, уменьшает количество дополнительных операций при заправке проволоки, что в совокупности приводит к повышению эффективности производства и улучшению комплекса механических свойств проволоки. Исследованию закономерностей деформации в многовалковых калибрах посвящены работы Полякова М.Г., Никифорова Б.А., Гуна Г.С., Баркова Л.А, Харитонов В.А, Шеркунова В.Г и др. Данный способ не нашел широкого промышленного применения из-за относительной сложности оборудования при сопоставимой фактической производительности по сравнению с волочением. На сегодняшний день данные проблемы имеют решения.

Эффективность процессов горячей прокатки катанки и холодной (теплой) прокатки передельной проволоки зависит от применяемых калибровок валков. Современные методики проектирования калибровок валков основаны на накопленном опыте применения тех или иных систем калибров и решают задачи получения требуемой точности размеров, стабильности процесса непрерывной прокатки, обеспечения необходимой вытяжной способности калибров при мак-

симально возможной равномерности формоизменения [1]. При этом тот факт, что прокатка в калиброванных валках характеризуется неравномерным напряженно-деформированным состоянием, вследствие чего в очаге деформации могут возникать растягивающие напряжения, которые оказывают негативное влияние на качество металла и его пластичность (деформируемость), в настоящее время при проектировании калибровок не учитывается. Принято считать, что напряженное состояние не оказывает негативного влияния на качество сортового проката при горячей прокатке, когда металл имеет достаточно высокие пластические свойства. Однако в тех случаях, когда прокатка в калибрах осуществляется при пониженных температурах (режимы термомеханической обработки, холодная или «теплая» прокатка) или обрабатываемый материал обладает низкой пластичностью (высоколегированные марки стали, сплавы цветных металлов), напряжения, возникающие в очаге деформации, могут привести к снижению качества проката, зарождению в металле микротрещин и его разрушению.

Процесс прокатки в двух- и многовалковых калибрах теоретически хорошо изучен с точки зрения механики процесса и деформированного состояния металла, однако литературные данные о напряженном состоянии металла в очаге деформации носят лишь качественный характер. В литературе встречаются отдельные работы по изучению напряженного состояния в процессах ОМД, но систематизированные исследования для прокатки в калибрах в настоящее время отсутствуют.

С учетом развития методов и средств компьютерного моделирования актуальной задачей на сегодняшний день является исследование влияния параметров деформирования металла в калиброванных валках на свойства проката и разработка на основе полученных результатов методики проектирования «свойствообразующих» систем калибров с учетом напряженно-деформированного состояния металла.

В данной статье представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла при горячей и холодной прокатке круг-

лого профиля в двух- и многовалковых калиброванных валках, полученных на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов с использованием программного комплекса Deform-3D.

Общий характер напряженно-деформированного состояния при прокатке в калибрах

По результатам конечно-элементного моделирования определены общие закономерности распределения напряжений в очаге деформации при прокатке в калибрах. Установлено, что напряженное состояние металла крайне неравномерно, в очаге деформации действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения вне зависимости от систем используемых калибров. Растягивающие напряжения достигают наибольших значений в продольном направлении прокатки. Действие данных напряжений обусловлено неравномерностью течения металла между контактирующими с инструментом зонами и остальным объемом металла. Можно выделить четыре зоны действия продольных растягивающих напряжений в очаге деформации (рис. 1):

– **Зона I** – осевая зона металла на протяжении от входа до 20-90% длины очага деформации (протяженность зоны зависит от схемы прокатки). Действие осевых продольных растягивающих напряжений обусловлено неравномерным деформированным состоянием в металле на расстоянии 10-15% от входа в очаг деформации. В данных сечениях заготовки деформация локализована в приконтактных слоях, соответственно в центре проката возникают продольные растягивающие напряжения. Наличие данной зоны характерно для всех многовалковых систем калибров, а также для двухвалковых систем при прокатке по схемам «неравноосное-равноосное» или «неравноосное-неравноосное» сечение.

В многовалковых системах на величину осевых напряжений оказывает влияние схема всестороннего обжатия металла. При всесторонней деформации приконтактных слоев возникает соответствующее отставание слоев металла в центральной зоне, компенсируемое растягивающими напряжениями.

– **Зона II** – внеконтактная зона по всей боковой поверхности проката в местах разъемов калибра. Наличие зоны характерно для всех систем калибров. Действие растягивающих напряжений во внеконтактных областях на боковой поверхности раската является общеизвестным фактом [2]. Неконтактирующие с инструментом объемы металла деформируются за счет возникающих растягивающих напряжений.

– **Зона III** – внеконтактная зона по всей поверхности проката на выходе из очага деформации. Наличие зоны характерно для всех систем калибров. Действие растягивающих напряжений в данной зоне связано с явлением «опережения» при прокатке. Внутренние слои металла стремятся «выйти» из очага деформации с большей скоростью по отношению к линейной скорости вращения валков, которые в свою очередь «сдерживают» это течение. В результате в приконтактных слоях возникают продольные растягивающие напряжения.

– **Зона IV** – внеконтактная зона на входе в очаг деформации. Наличие зоны зависит от схемы прокатки.

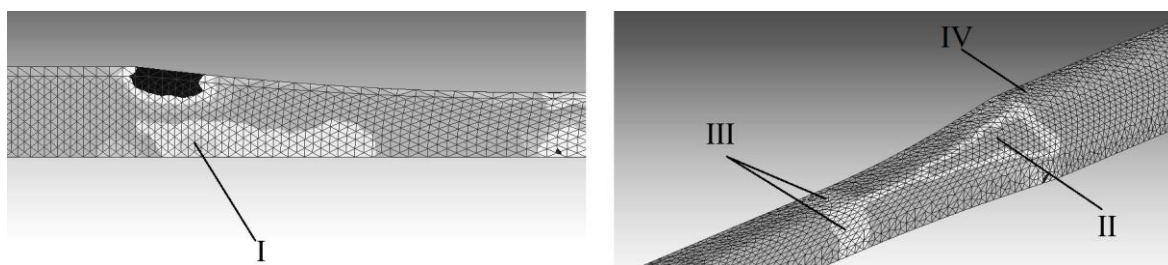


Рис. 1. Зоны действия продольных растягивающих напряжений в очаге деформации при продольной прокатке в калибре

Для оценки влияния напряжений на свойства прокатываемого изделия использовали критерий разрушения Кокрофта-Латама, характеризующий запас пластичности металла:

$$D = \int \frac{\sigma^*}{\sigma_i} d\varepsilon_i,$$

где ε_i – интенсивность деформаций по Мизесу; σ^* – максимальное главное напряжение; σ_i – интенсивность напряжений по Мизесу.

Анализ распределения полученных значений критерия разрушения D по сечению прокатываемой заготовки показал, что наиболее подвержены разрушению внеконтактная и осевая зоны металла (разъемы калибра и центр заготовки). Значения критерия разрушения D в данных зонах в десятки раз выше, чем в остальном объеме металла (рис. 2). Таким образом, наибольшее влияние на запас пластичности металла оказывают осевые напряжения в зоне I и внеконтактные в зоне II очага деформации.

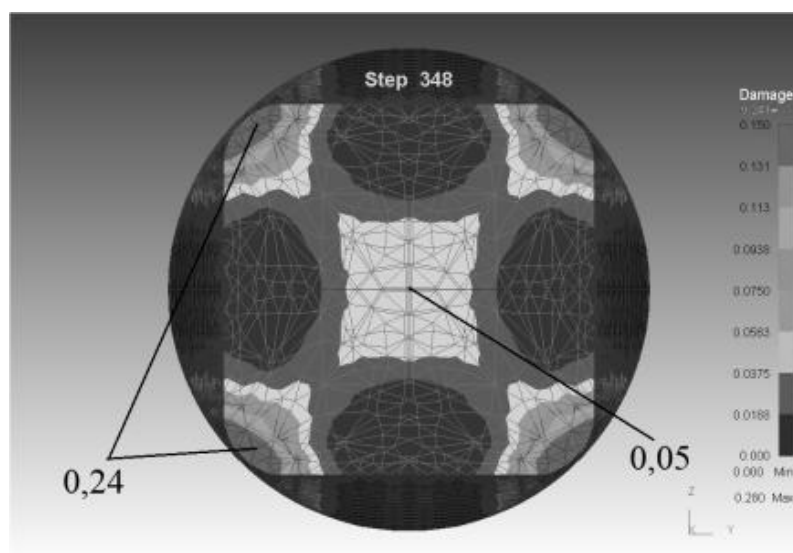


Рис. 2. Распределение значений критерия разрушения D по сечению квадратного профиля, прокатанного в четырехвалковом калибре

Деформированное состояние металла хорошо изучено как для двух-, так и для многовалковых систем калибров [3]. Полученные на основе моделирования результаты подтверждают известные закономерности. Для прокатки в двухвалковых системах характерна высокая неравномерность деформации по всему сечению прокатываемой полосы, интенсивность дефор-

мации максимальна в центральной части проката и минимальна во внеконтактных зонах. При прокатке в многовалковых системах деформация распределяется более равномерно. На рис. 3 представлен анализ распределения значений интенсивности деформаций Мизеса по высоте и ширине прокатываемой в различных системах калибров полосы.

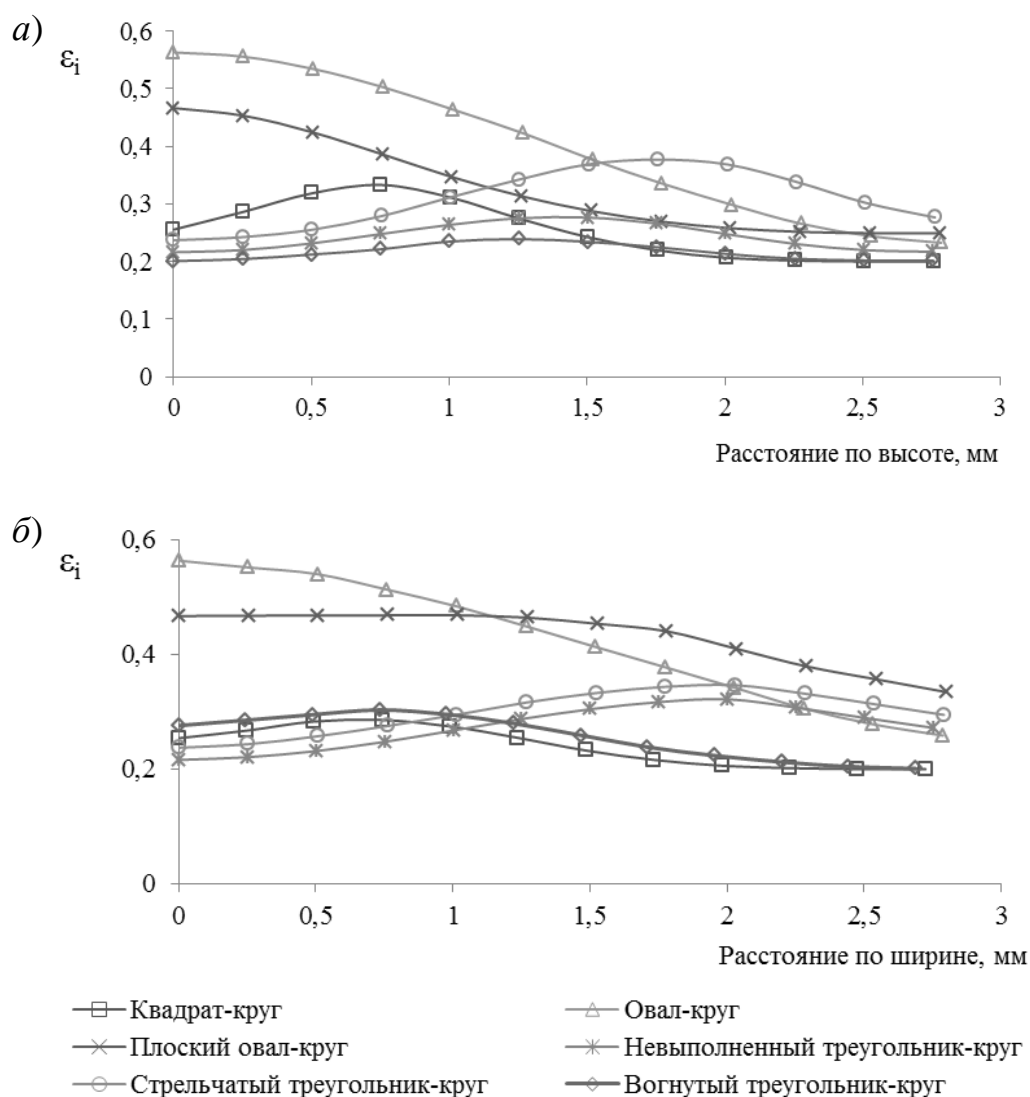


Рис. 3. Распределение интенсивности деформации Мизеса по высоте (а) и ширине (б) проката в различных системах калибров (степень деформации одинакова)

Анализ традиционно применяемых систем калибров

Для выявления значимых элементов калибровки, влияющих на напряженное состояние в отмеченных зонах очага деформации, моделировали горячую и холодную прокатку по известным традиционно применяемым системам двух- и многовалковых калибров. При этом параметры прокатки: материал заготовки, скорость обработки, условия трения – оставались постоянными. Изме-

няли форму калибра и заготовки, степень заполнения калибров и степень деформации.

По результатам сравнительного анализа двухвалковых и многовалковых систем калибров установлено, что величина осевых продольных растягивающих напряжений в двухвалковых системах зависит от соотношения осей прокатываемой заготовки: чем больше данное соотношение, тем больше неравномерность деформации по высоте проката и выше растягивающие напряжения в центре. При прокатке по схеме равноосное-неравноосное сечение осевые продольные растягивающие напряжения в металле отсутствуют. Сравнительный анализ систем однорадиусный овал-круг и плоский овал-круг показал, что уровень осевых напряжений при прокатке плоского овала в круглом калибре на 40-60% ниже, чем при прокатке однорадиусного овала (рис. 4, а)

Все многовалковые системы калибров по сравнению с двухвалковыми характеризуются более высокими осевыми растягивающими напряжениями (напряжения выше на 15-75%) из-за всестороннего обжатия заготовки. Соответственно снижение запаса пластичности в центральных слоях металла при прокатке в многовалковых системах в процессе прокатки происходит интенсивнее.

Внеконтактные растягивающие напряжения (зона II) достигают наибольших значений при прокатке в двухвалковых системах калибров. Величина данных напряжений зависит от «степени охвата» заготовки валками по всей длине очага деформации. Чем меньше боковая неконтактная поверхность, тем меньше растягивающие напряжения и больше запас пластичности металла в данных зонах.

При проведении сравнительного анализа прокатки по схемам однорадиусный овал-круг и плоский овал-круг установлено, что использование плоского овала предпочтительно. Величина растягивающих напряжений в зоне разъемов калибров в данном случае ниже на 15-30% по сравнению со схемой однорадиусный овал-круг (рис. 4, б).

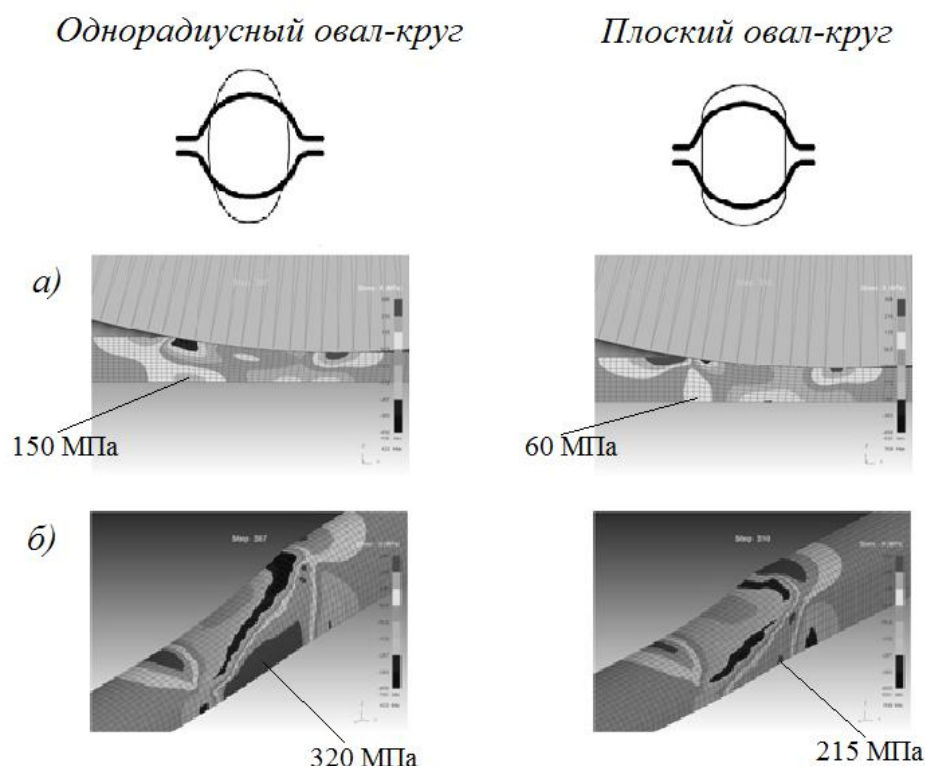


Рис. 4. Растягивающие продольные напряжения в зонах I (а) и II (б) и при моделировании горячей прокатки по схемам «однорациусный овал-круг» и «плоский овал-круг»

Большинство многовалковых систем позволяют снизить внеконтактные напряжения в зонах разъемов калибра. Благодаря многостороннему обжатию и большему «охвату» по периметру полосы зоны внеконтактной деформации минимальны, соответственно меньшие объемы металла подвергаются растяжению.

На примере прокатки по схеме круг-квадрат в четырехвалковом калибре проведено исследование влияния степени деформации и заполнения калибра на характер и величину растягивающих напряжений в осевой и внеконтактных зонах очага деформации. По результатам моделирования отмечено, что с увеличением степени деформации зоны I и II действия растягивающих напряжений увеличиваются, при этом максимальные значения напряжений практически не изменяются. При этом вероятность разрушения металла возрастает на боковой внеконтактной поверхности проката интенсивнее, чем в осевой зоне (рис. 5).

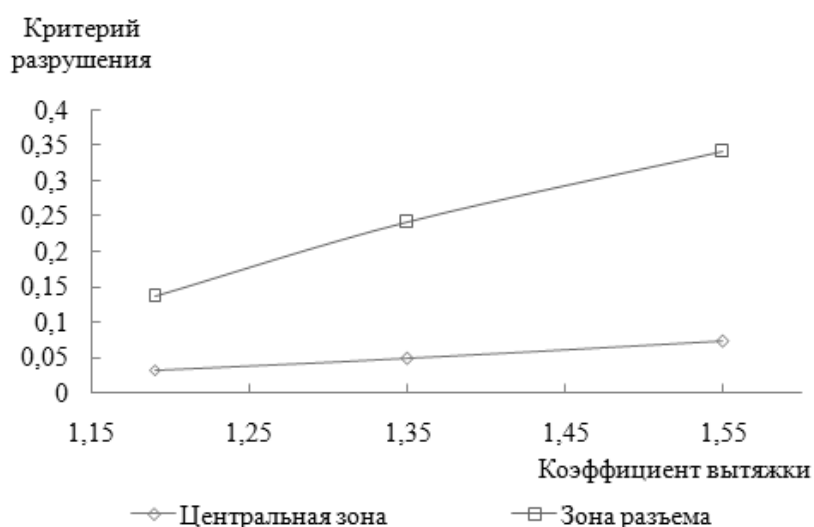


Рис. 5. Влияние степени деформации на запас пластичности металла в зонах I и II при прокатке круглого профиля в квадратном калибре

При анализе данных результатов необходимо учитывать, что при непрерывной прокатке внеконтактные зоны металла могут обновляться (чередоваться) от прохода к проходу, тогда как осевая зона деформируется в неблагоприятных условиях в каждом проходе.

Полученные по результатам моделирования данные согласуются с экспериментальными результатами холодной прокатки в системе калибров круг-квадрат. На рис. 6 представлен образец труднодеформируемого металла, прокатанного из исходной круглой заготовки в квадратном четырехвалковом калибре. Как видно из рисунка, образец «изрезан» поперечными трещинами по ребрам квадрата.

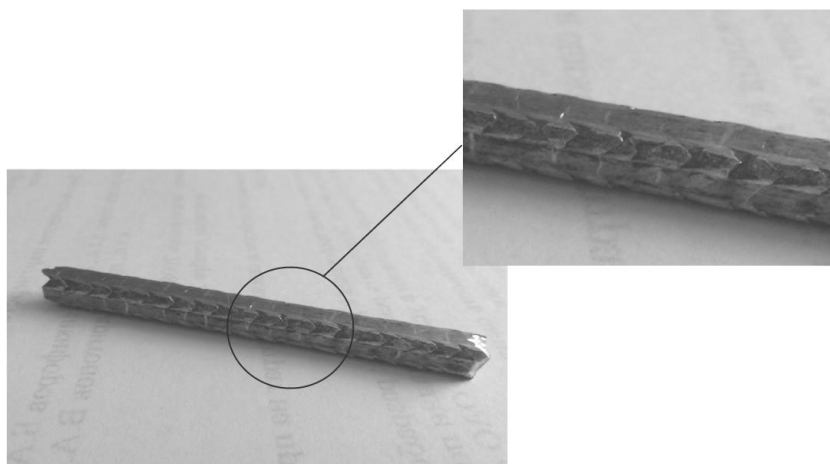


Рис. 6. Образец труднодеформируемого металла, полученный при экспериментальной прокатке по схеме круг-квадрат

Анализ «новых» систем калибров

С целью определения возможности управления напряженно-деформированным состоянием металла при прокатке проведен сравнительный анализ традиционно применяемых и «новых» (ранее неприменяемых) систем калибров (рис. 7) (для удобства анализа и систематизации получаемых данных каждой из рассмотренных схем прокатки присвоен порядковый номер).

Системы № 1-3 традиционно применяются при многовалковой прокатке, остальные схемы прокатки не получили массового распространения из-за малой изученности и описаны в авторских свидетельствах [4-10].

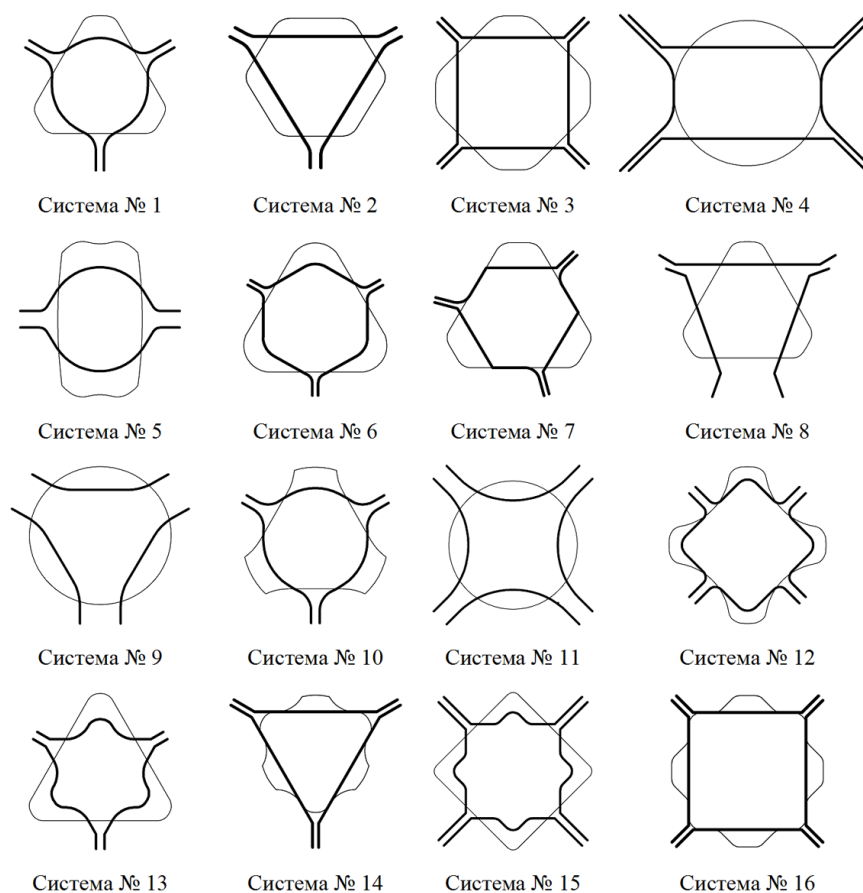


Рис. 7. Анализируемые системы калибров

Результаты анализа представлены в таблице 1. Установлено, что характер распределения растягивающих напряжений в очаге деформации при прокатке по всем рассмотренным схемам аналогичен, при этом среди рассмотренных

схем выявлены системы калибров, выгодно отличающиеся по отдельным показателям от традиционно применяемых калибровок. Так, системы №5, 14, 16 позволяют получать проволоку с высоким запасом пластичности в осевой части заготовки, а система №12 – в зоне разъема калибров. Системы №2, 6, 13, 15 обладают высокой вытяжной способностью наряду с относительно благоприятными показателями напряженно-деформированного состояния.

Таблица 1

Данные сравнительного анализа систем калибров

Калибровка	Вы- тяжка μ	Продольные напряжения, МПа		Критерий разрушения D	
		Центр (Зона I)	Разъем (Зона II)	Центр	Разъем
Система №1	1,33	425	595	0,07	0,17
Система №2	1,49	540	511	0,08	0,21
Система №3	1,43	536	622	0,09	0,19
Система №4	1,29	237	1100	0,07	0,22
Система №5	1,43	320	930	0,02	0,26
Система №6	1,42	610	739	0,10	0,22
Система №7	Полоса неустойчива в калибре				
Система №8	Полоса неустойчива в калибре				
Система №9	1,42	380	928	0,09	0,30
Система №10	1,41	527	600	0,13	0,18
Система №11	1,42	517	847	0,09	0,26
Система №12	1,29	535	520	0,07	0,07
Система №13	1,46	517	528	0,10	0,21
Система №14	1,26	277	1050	0,03	0,21
Система №15	1,40	539	610	0,09	0,18
Система №16	1,35	436	970	0,05	0,23

Величина напряжений во внеконтактной зоне деформации зависит от формы боковой поверхности заготовки и, как уже отмечалось, «степени охвата»

металла по всей длине очага деформации. Наилучшие условия деформирования внеконтактных зон получены в системе №12 при прокатке заготовки с вогнутыми гранями и всесторонним «охватом» на всей протяженности очага деформации. Наихудшие условия деформирования внеконтактных зон наблюдаются в системах №4, 5, 9, 11, 14, 16 с большой зоной «свободной» поверхности.

Учитывая преимущества и недостатки каждой схемы прокатки с точки зрения напряженного состояния в очаге деформации, можно проектировать более эффективные системы калибровки валков в зависимости от особенностей оборудования, технологии, обрабатываемого материала и других факторов.

Что касается деформированного состояния, то поскольку способ продольной прокатки в калибрах относится к монотонным процессам, возможности управления пластическим течением металла в технологических процессах производства сортового проката, в том числе и катанки, существенно ограничены. Потенциал пластической деформации как способа управления структурными преобразованиями в металле при сортовой прокатке используется не в полной мере.

Для измельчения микроструктуры катанки или передельной проволоки может быть использован способ продольной прокатки в двухвалковых калибрах, нарезанных на конических валках (рис. 8).

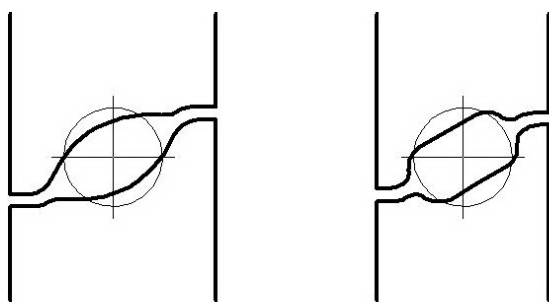


Рис. 8. Скошенные калибры

Анализ полей сдвиговых деформаций в поперечно-вертикальной плоскости γ_{yz} , выполненный при моделировании, показал, что прокатка в неравноосных двухвалковых калибрах, выполненных с углом скоса 30° , способствует увеличению сдвиговых деформаций в поперечном сечении металла более чем в 3 раза. Высокие значения

γ_{yz} являются характеристикой дополнительного макросдвига одной части

заготовки относительно другой по плоскости, наклоненной на определенный угол. Применение скошенных неравноосных калибров при сортовой прокатке обеспечивает наличие дополнительных сдвиговых деформаций в прокатываемой заготовке без увеличения степени относительной деформации. Высокая интенсивность деформации сдвига влияет на измельчение зерна металла, улучшение его структуры и комплекса механических свойств.

Данный способ можно рекомендовать к применению как в процессах горячей прокатки сортового проката и катанки, так и холодной прокатки круглой заготовки под волочение.

Влияние способа подвода энергии на напряженное состояние

Для снижения продольных растягивающих напряжений в металле при производстве проволоки может быть применен комбинированный способ прокатка-прессование. При данном способе деформация осуществляется поочередно в приводных, а затем за счет проталкивающего усилия в не приводных валках. Схожий способ применяется при горячей прокатке сортовых и фасонных профилей. Применению данного способа посвящены многочисленные работы украинских и отечественных ученых (С.М. Жучков, Л.В. Кулаков, Э.В. Сивак, А.П. Лохматов, В.Н. Перетятко, А.Р. Фастыковский и др.). Использование сочетания приводных и не приводных клетей позволяет уменьшить энергозатраты по сравнению с прокаткой со всеми приводными валками, упростить и удешевить прокатное оборудование и его эксплуатацию, тем самым снизить затраты на производство проволоки и повысить ее конкурентоспособность.

По результатам конечно-элементного моделирования установлено, что процесс прокатка-прессование (в компоновке приводная-не приводная клеть) обеспечивает более благоприятную схему напряженного состояния металла по сравнению с традиционной продольной прокаткой в приводных валках.

Благодаря проталкиванию заготовки через неприводные валки снижаются растягивающие продольные напряжения, действующие в следующих объемах металла (рис. 9):

- а) в осевой зоне в неприводном калибре (снижение на 80%, в 4 раза);
- б) в поверхностной зоне металла на выходе из очага деформации при прокатке в приводном калибре (снижение на 50%);
- в) в зоне разъемов калибра неприводной клетки (снижение на 20%).

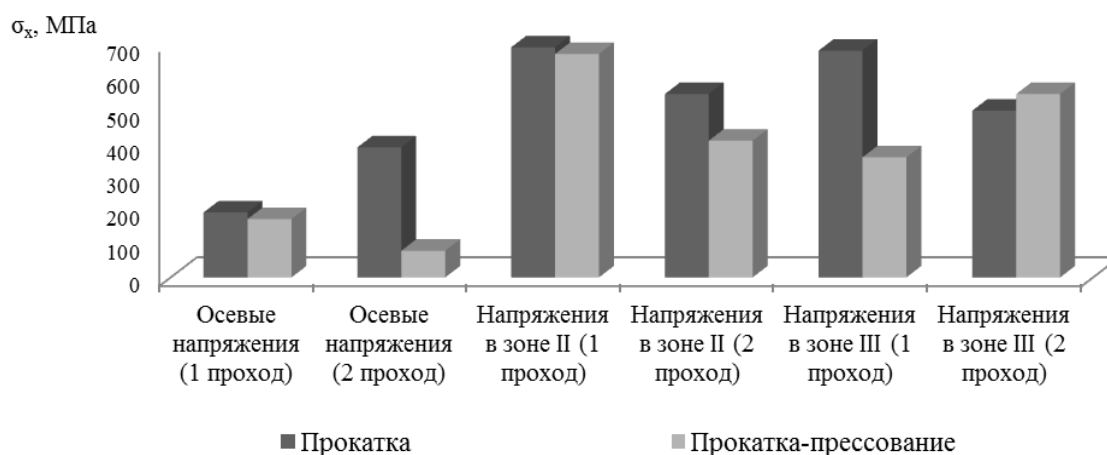


Рис. 9. Сравнительный анализ напряженного состояния металла в процессах продольной прокатки и прокатки-прессования

Значительное снижение растягивающих напряжений в очаге деформации показывает, как способ подвода энергии в очаг деформации влияет на схему напряженного состояния. При многовалковой прокатке продвижение металла через очаг деформации осуществляется за счет активных сил трения со стороны валков, при этом в металле возникают дополнительные напряжения в тех объемах, течение которых «отстает» (осевая и внеконтактные зоны) от приконтактных слоев металла. За счет применения неприводных валков и проталкивания заготовки через очаг деформации меняется характер течения приконтактных слоев, характер трения становится реактивным. В результате в объеме очага деформации снижается разность скоростей течения металла, соответственно снижается величина растягивающих напряжений.

При деформировании металла по способу «прокатка-прессование» по сравнению с обычной прокаткой на 100% (в два раза) повышается запас пластичности центральных слоев металла и на 20% – поверхностных, соответствующих контактной поверхности при первом проходе и разьему при втором. Наиболее подвержены разрушению поверхностные слои металла, соответствующие разьемам калибра в приводной клетке. Зная это и учитывая осесимметричность заготовки (круглый профиль), при следующих проходах в приводных клетках валки можно располагать таким образом, чтобы зоны металла с наиболее сниженным запасом пластичности являлись контактирующими, т.е. деформировались в зоне благоприятной схемы напряженного состояния. Благодаря подобному управляемому снижению пластичности заготовки можно добиться повышения степени максимально возможной суммарной деформации при холодной обработке.

Данный способ промышленно опробован в условиях ОАО «БМК» при производстве проволоки диаметром более 8 мм [11].

Рекомендации проектирования систем калибров и процессов прокатки заготовки под волочение

На основе полученных результатов при проектировании процессов прокатки катанки и передельной проволоки можно дать следующие рекомендации:

1. Для минимизации величины растягивающих напряжений в центральной части проволоки (катанки) рационально применять двухвалковые системы калибров. Предпочтительно использование систем с меньшим отношением осей неравноосных калибров (например, система плоский овал-круг).
2. Для обеспечения равномерности деформации и микроструктуры в стали необходимо применять многовалковые системы калибров.
3. Для минимизации величины растягивающих напряжений в поверхностном слое внеконтактных зон целесообразно применять многовалковые системы калибров. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- форма боковых граней заготовки должна быть прямой или вогнутой;
- калибр должен максимально «охватывать» контур заготовки по всей длине очага деформации, площадь внеконтактных зон должна быть минимальной;
- применение калибров с выпуклым дном не рекомендуется.

4. Для повышения пластичности металла по всему сечению рационально использовать комбинированные способы прокатки в двух и многовалковых системах калибров, а также способ прокатка-прессование (в компоновке приводная-неприводная клеть).

5. Для получения мелкодисперсной структуры в сталях с достаточным уровнем пластичности, целесообразно использовать прокатку в двухвалковых неравноосных калибрах, нарезанных на конических валках. Прокатка в скошенных калибрах может быть реализована на непрерывных станах горячей и холодной прокатки.

Библиографический список

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: учебное пособие для вузов. Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
2. Эффективность деформации сортовых профилей / С.А.Тулупов, Г.С.Гун, В.Д.Онискив, В.А.Курдюмова, К.Л.Радюкевич. М.: Металлургия, 1990. 280 с.
3. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах / М.: Металлургия, 1979. 240 с.
4. А.с. 1475742 СССР, МКИ В21 В1/16. Система калибров для прокатки круглых профилей / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А. Харитонов и др. // БИ. 1989. №16. С. 54.

5. А.с.: 1399965 СССР, МКИ В21 В1/08. Система вытяжных трехвалковых калибров / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А. Харитонов и др. // БИПМ. 2001. №31. С. 412.
6. А.с.: 1349068 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Система вытяжных многовалковых калибров / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А. Харитонов и др. // БИПМ. 2001. №31. С. 412.
7. А.с.: 1376332 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Система вытяжных многовалковых калибров / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А.Харитонов и др. // БИПМ. 2001. №31. С. 412.
8. А.с.: 829218 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Система вытяжных многовалковых калибров / Б.А.Никифоров, В.А.Харитонов, Г.П.Логийко и др. // БИ.1981. №18. С. 39.
9. А.с.: 1195517 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Система вытяжных многовалковых калибров / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А.Харитонов и др. // БИПМ. 2001. №31. С. 412.
10. А.с.: 1135072 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Система вытяжных трехвалковых калибров / Б.А.Никифоров, Вен.А.Харитонов, Вик.А.Харитонов и др. // БИПМ. 2001. №26. С. 373.
11. Освоение нового вида струнобетонной проволоки и пуск в эксплуатацию непрерывного шестиклетьевого стана с трехвалковыми калибрами в условиях БМК: Отчет о НИР / МГМИ. Магнитогорск, 1979. 72 с.

С.А. Левандовский, О.В. Синицкий, Н.А. Ручинская
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

ОПЫТ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ КАЛИБРОВ ПО КРИТЕРИЮ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Одним из самых действенных инструментов воздействия на результат производства сортопрокатной продукции является коррекция калибровок валков. На сегодняшний день можно выявить множество критериев, которые могут быть взяты за основу для создания математических моделей по модификации формы калибров различного назначения. Рассматриваемый в работе подход ориентируется на использование в качестве такого критерия коэффициента неравномерности деформации ($K_{\text{нер}}$). Основными причинами выбора $K_{\text{нер}}$ как критерия оптимизации являются: потенциальная возможность снизить усилие прокатки (за счёт перераспределения обжатий и варьирования площадью контактной поверхности); повышение эффективности калибровки - вытяжной способности прокатных валков; сокращение количества зон повышенной пластической деформации в очаге деформации; снижение износа прокатных валков.

Ключевые слова: сортовая прокатка, неравномерность деформации, оптимизация формы калибра, калибровка валков.

Рассмотрим опыт применения структурно-матричного подхода при оптимизации формы калибров для повышения результативности сортовых станов [1]. Материалы данной публикации основаны на исследованиях, результаты которых нашли применение в рамках сортопрокатного комплекса ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») в период с 2003 по 2007 гг.

При математическом моделировании технологического процесса на основе структурно-матричного подхода и элементов оптимизации рассматриваются следующие критерии [1, 2]:

$K_{нер}$ — неравномерности деформации;

$K_{стаб}$ — стабильности процесса;

$K_{точн}$ — точности;

$K_{техн}$ — технологичности.

Подробно эти критерии рассматриваются в работах [1, 2].

Управление этими критериями посредством изменения формы калибров оказывает прямое влияние на геометрию готового проката.

Рассматривая взаимосвязи этих критериев [1], приходим к заключению, что линия наследования информации выстроена следующим образом:

$K_{нер} \leftarrow K_{техн} \leftarrow K_{стаб} \leftarrow K_{точн}$, откуда следует, что форма калибра или калибров, связанных в технологическую цепочку, оказывает непосредственное влияние: на движение металла в очаге деформации; равномерность и распределение механических свойств, основанные на допустимой неравномерности деформации; на работу, совершаемую в процессе прокатки [3, 4].

Управляя формой калибров, можно достаточно эффективно воздействовать на процесс сортовой прокатки и обеспечивать необходимое качество готовой продукции.

В качестве критерия оптимизации (целевой функции) рассмотрим функционал $F^0\{\bar{x}(\omega), \omega\}$, который необходимо минимизировать:

$$F^0\{\bar{x}(\omega), \omega\} = \min f^0(\bar{x}(\omega)\omega). \quad (1)$$

Таким образом, задача сводится к отысканию вектор-функции $\bar{x}(\omega)$, минимизирующей функционал $F^0\{\bar{x}(\omega), \omega\}$ при некоторых ограничениях типа неравенств. Минимизация функционала в этом случае означает стремление к

минимуму коэффициента неравномерности деформации $K_{нер}$, а ограничения типа неравенств есть технологические ограничения, рассмотренные далее (задача является однокритериальной).

Описание ограничений

Ограничения можно разделить на две группы: ограничения типа равенств и ограничения типа неравенств. В качестве ограничений типа равенств выступили заполнение калибра металлом и допустимая нагрузка на оборудование [3, 5], а ограничениями типа неравенств являются вытяжка и предел варьирования формы [6, 7]. Заполнение оценивается по существующей и хорошо зарекомендовавшей себя методике, рассмотренной в работах [1, 8, 9]. Нагрузки, оказывающие прямое воздействие на оборудование при прокатке, вычисляли по известной методике, предложенной в работах [2, 9, 10].

В рассматриваемой модели оптимизации формы калибра используются два ограничения вида неравенств, имеющие функциональную зависимость (от варьируемых факторов формы) типа:

$$y_1 = f(x_1, \dots, x_n), \quad (2)$$

$$y_2 = f(x_1, \dots, x_n), \quad (3)$$

где y_1 – ограничение по вытяжке; y_2 – ограничение по пределу варьирования формы калибра.

Условия неравенств для зависимостей (2) и (3) можно записать так:

$$\mu_{min} \leq y_1 \leq \mu_{max}, \quad (4)$$

$$D_{min} \leq y_2 \leq D_{max}, \quad (5)$$

где μ_{min} , μ_{max} – минимально и максимально допустимые вытяжки соответственно для рассматриваемой системы калибров;

D_{min} , D_{max} – минимально и максимально допустимый диаметр прокатного валка соответственно в точке варьирования вектора формы.

Максимальное μ_{max} и минимальное μ_{min} значения вытяжек определяются исходя из используемой системы калибров, для каждой из которых, как известно, существует диапазон возможных вытяжек [11-14] (табл. 1).

Таблица 1

Вытяжная способность систем калибров

Система калибров	Вытяжка	
	мин	макс
Овал-квадрат	1,60	1,70
Квадрат-шестигранник	1,50	1,60
Ящичные калибры	1,35	1,45
Ромб-Квадрат	1,35	1,45
Ребровой овал-Овал	1,35	1,45
Овал-Круг	1,25	1,30

Следует отметить, что модель предназначена для оптимизации формы калибров, используемых при производстве сортового проката простой формы («простой профиль», «простой калибр»).

Чтобы автоматизированно определять систему калибров для прокатки простых профилей, был разработан алгоритм однозначной идентификации системы калибров.

Работа ведётся с массивом данных размерностью в 200 единиц, который представляет собой двухсотвекторное описание четверти простого калибра. С целью определения типа калибра используется лишь небольшая часть информации, а не весь массив.

Из двухсот существующих выбираются шесть векторов (назовём их вычлененными), имеющие порядковые номера 1, 10, 40, 80, 120 и 160 (рис. 1). В случае описания четверти простого калибра векторами в количестве 50 штук рекомендуется выбирать 1, 3, 10, 20, 30-ый и 40-ой вектор соответственно.

Полярные координаты (α_i и a_i) вычлененных векторов переводятся в декартовые:

$$\begin{aligned} x_i &= \sin(\alpha_i) a_i, \\ y_i &= \cos(\alpha_i) a_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где x_i и y_i – декартовые координаты, α_i – угол для i -го вектора из его полярных координат, a_i – длина i -го вектора.

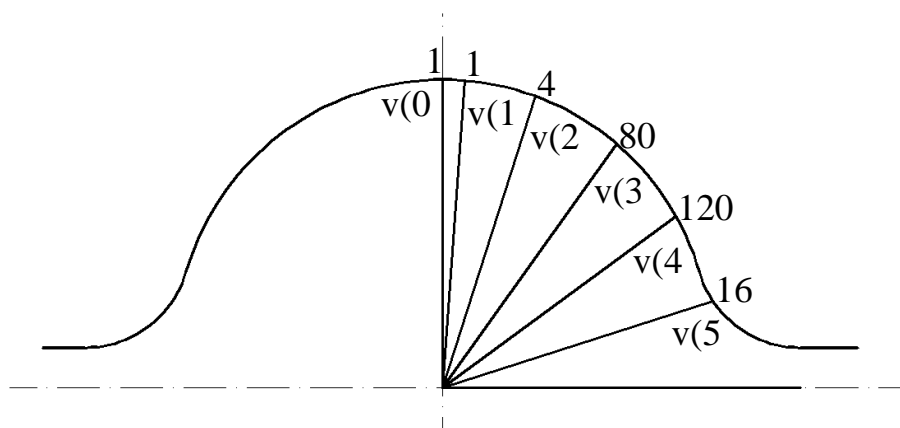


Рис. 1. Векторы, необходимые для идентификации типа калибра

Из вычлененных векторов $v[i]$ в декартовых координатах формируется два массива $x[i]$ и $y[i]$ (значения абсциссы и ординаты) с индексом от нуля до пяти (массивы назовём определяющими).

Рассмотрим условия, по которым определяется тип калибра из возможных: ящичный, овальный, ромбический, шестигранный, квадратный, круглый или ребровой овал.

Калибр является ящичным в двух случаях:

$$\frac{(y[1] - y[4])}{x[4]} \geq 1,2 \quad (7)$$

или

$$\frac{(y[1] - y[4])}{x[4]} \leq 0,3. \quad (8)$$

В случае выполнения условия (7) мы имеем ящичный квадрат, для которого $tg\alpha \geq 1,2$ (рис. 2, а), во втором случае (условие (8)) – ящичный прямоугольник, для которого $tg\alpha \leq 0,3$ (рис. 2, б). В случае условия (7) точка $(x[1], y[1])$ лежит на дне калибра, точка $(x[4], y[4])$ – на боковой стенке калибра, а в случае (8) – обе точки лежат на дне калибра.

В случае невыполнения условий (7) и (8) калибр имеет вогнутое дно и представляет собой либо ромб, либо овал, либо шестиугольник (квадрат – частный случай ромба, круг – овала).

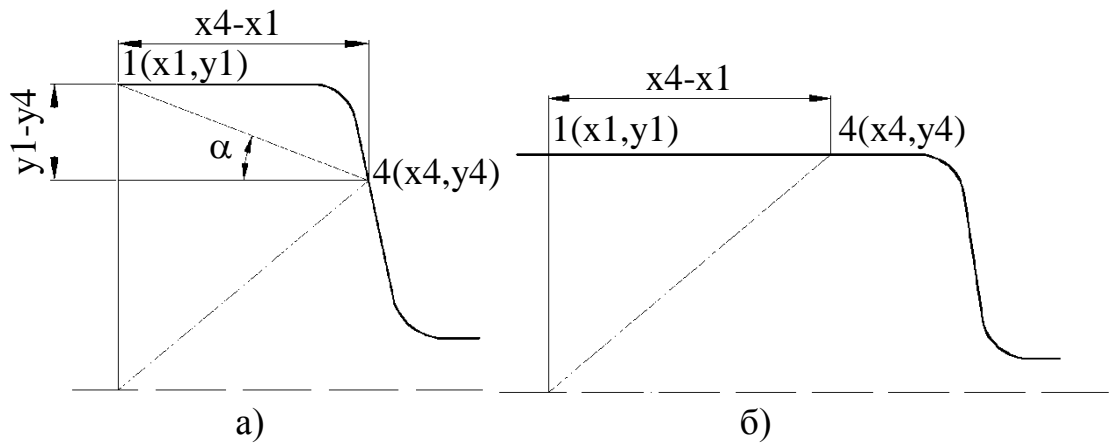


Рис. 2. Определение ящичного калибра:

а) – ящичный квадрат, б) – ящичный прямоугольник

Калибр является ромбическим, если выполняется условие:

$$\frac{(y[2] - y[0])}{x[0]} \geq 0,1. \quad (9)$$

В этом случае выбраны вычлененные векторы 1 и 0. Овал явно отличается от ромба отсутствием перегиба в точке $(x[1], y[1])$ (рис. 3, а). Это означает, что в точках, лежащих в окрестности точки $(x[1], y[1])$ (в том числе в точке $(x[0], y[0])$), касательная к линии, описывающей калибр, будет стремиться к нулю ($tg(\alpha) < 0,1$). Условие (9) соответствует случаю ромба (рис. 3, б).

Для выявления квадратных сечений среди ромбических (рис. 3, б) используется условие определенного угла наклона боковой стенки калибра. Калибр является квадратным при выполнении условия:

$$\frac{(y[2] - y[4])}{(x[2] - x[4])} \geq 1,9. \quad (10)$$

Это означает, что стенка калибра наклонена к горизонтали под углом около 45° и перед нами калибр квадратной формы.

Для выделения среди ромбов шестиугольных калибров, для которых угол наклона дна к горизонтали составляет 30° , применено условие:

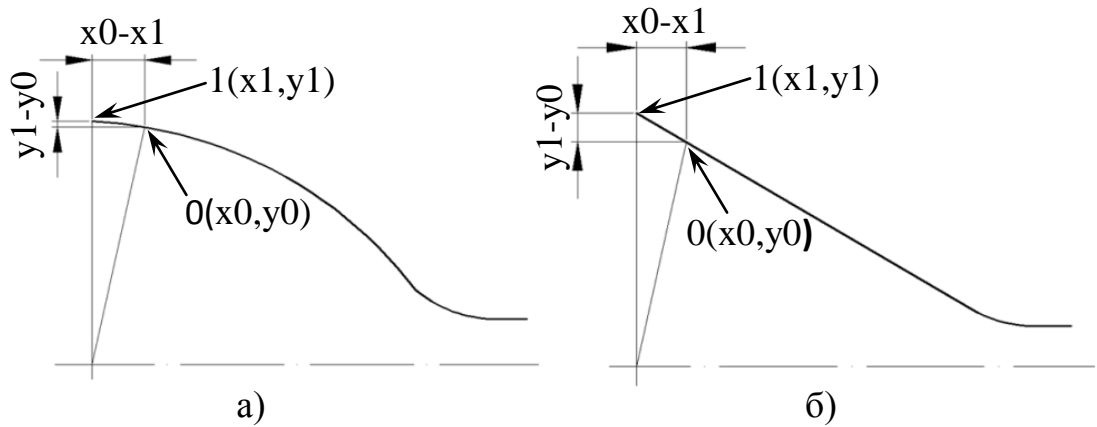


Рис. 3. Определение овального (а) и ромбического (б) калибров

$$\left| \frac{(y[2] - y[4])}{(x[2] - x[4])} \right| \sqrt{3} \leq 1,5. \quad (11)$$

За основу условия, определяющего круглый калибр, взят ГОСТ 30136-94 [15] на катанку, допускающий её овальность в пределах 2% от диаметра. Это ограничение можно представить в виде:

$$\left| \frac{\sqrt{x[1]^2 + y[1]^2} - \sqrt{x[3]^2 + y[3]^2}}{\sqrt{x[1]^2 + y[1]^2}} \right| \leq 0,02. \quad (12)$$

Для определения ребрового овала используется сравнение вычлененных векторов, близких по положению к его полуосям, а это векторы 1 и 5.

Овал является ребровым, если:

$$\sqrt{x[1]^2 + y[1]^2} \geq \sqrt{x[5]^2 + y[5]^2}. \quad (13)$$

Используя описанный алгоритм определения типа калибра и данные, изложенные в таблице 1, можно чётко сформировать ограничение типа неравенства, описанное формулой (4). Чтобы найти границы допустимого диапазона вытяжек, необходимо:

- определить тип калибра;
- выбрать последовательность систем калибров;
- задать границы диапазона на основе табл. 1.

Ограничение по варьированию формы

При постановке ограничения по варьированию формы калибра необходимо рассмотреть факторы, обуславливающие максимальную и минимальную глубину ручья на прокатных валках.

Во-первых. Для прокатки металла используются валки, снятие поверхностного слоя которых при переточках возможно максимум на 30% от радиуса валка. Это объясняется повышенной твёрдостью и прочностью валков в этом диапазоне, так как технологически только эта часть валка предназначена для работы. Например, на станах 170, 370, 450 ОАО «ММК», по информации фирмы Danieli, максимальная глубина такого слоя для последнего чистового калибра составляет 26, 56 и 67 мм соответственно, но это при условии удаления всего рабочего слоя валка, что недопустимо с точки зрения прикладываемых нагрузок и износа. Можно сделать вывод, что 30-процентное ограничение является условным, а в реальных ситуациях при переточках и изнашивании максимально снимаемый слой составит 20-28% от радиуса валков.

Во-вторых. Конечный профиль обусловлен стабильностью геометрии всех предшествующих сечений. Отклонение геометрических размеров металла может привести к образованию различных поверхностных дефектов или даже к аварийным ситуациям. Постоянство уровня заполнения калибра зависит от множества факторов, в том числе и от формы калибра. Критически снижая или повышая площадь сечения калибра, можно превысить нагрузки на оборудование, получить неудовлетворительное сечение раската, нарушить стабильность работы стана в целом и т.д. Учитывая закон постоянства объёма и его следствие – константу стана, необходимо строго выдерживать скоростной режим и режим вытяжек. Поэтому нижней границей варьирования формы калибра можно считать минимально возможную площадь сечения, удовлетворяющую параметрам прокатки и условию стабильности процесса.

Подведя итог сказанному, можно определить пределы варьирования формой калибра:

- верхний предел ограничивается максимально возможной площадью сечения калибра, которая зависит от эксплуатационных свойств валков и от предельных вытяжек конкретной системы калибров;
- нижний предел должен быть ограничен условием попадания в заданный диапазон вытяжек.

Использование модели показало, что наиболее рациональным следует считать отклонение (при оптимизации) от базового значения вектора в пределах 15%.

Описание математической модели

В период 2004-2006 гг. при выполнении научных исследований и деятельности по накоплению и сохранению технологических сведений сортопрокатного производства ОАО «ММК» была апробирована и эффективно применена математическая модель по оптимизации формы простых калибров.

В качестве цели моделирования определено совершенствование существующей системы менеджмента качества ОАО «ММК» на основе снижения неравномерности деформации, улучшения показателей точности геометрии проката и расширения области применения калибровки за счёт прогнозирования различных вариантов технологических схем.

На основе поставленной цели сформированы задачи математического моделирования:

- совершенствование существующей системы менеджмента качества на этапах проектирования и производства продукции;
- снижение неравномерности деформации в технологических схемах на основе применения результатов моделирования формы калибров;
- повышение эффективности работы калибровки валков за счёт снижения затрат энергии на прокатку.

Математическая модель была представлена в виде программной реализации на основе алгоритма (рис. 4), структурные составляющие которого отражены в таблице 2.

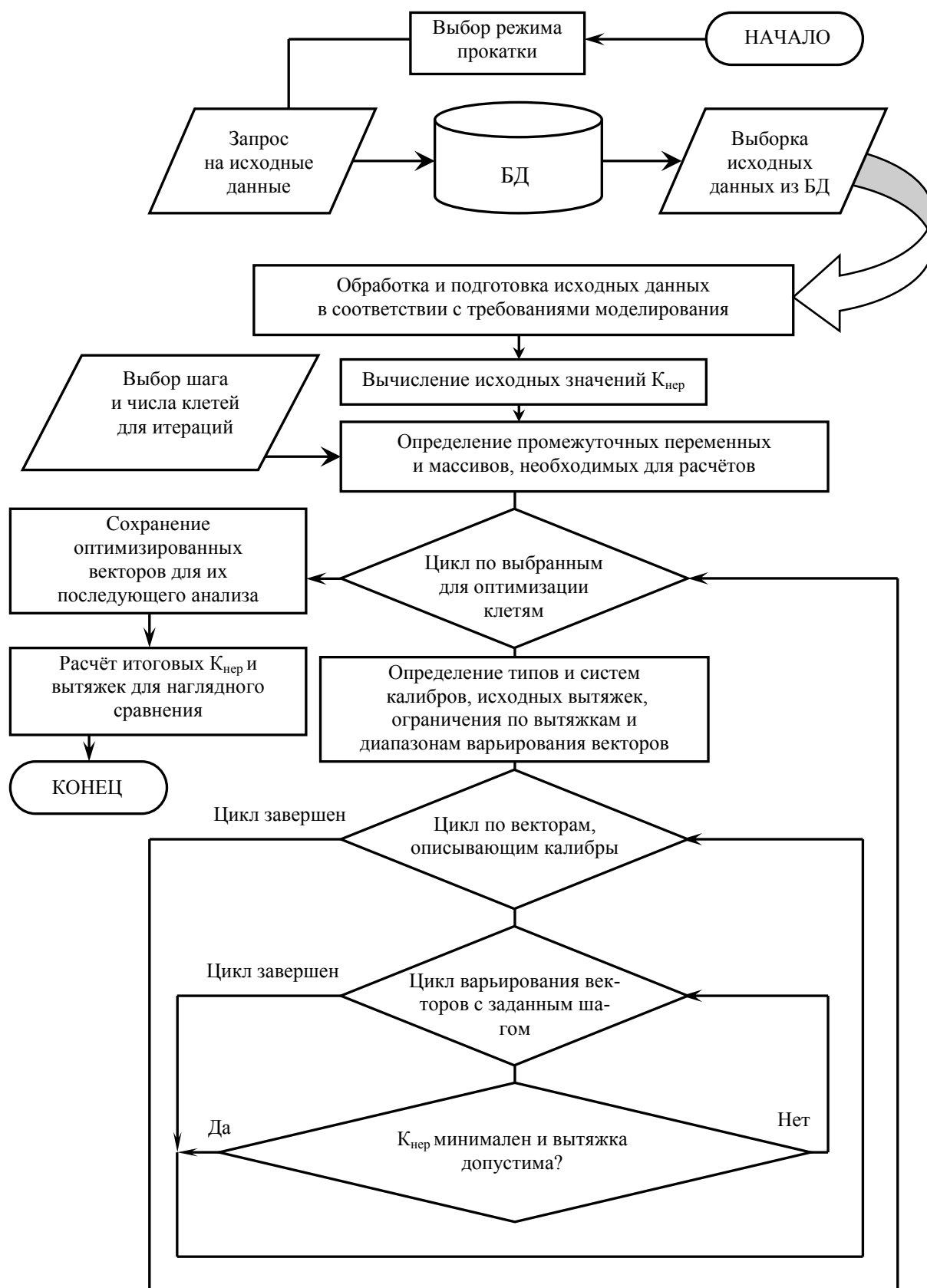


Рис. 4. Общий структурный алгоритм оптимизации формы простого калибра

Таблица 2

Комментарии к некоторым блокам алгоритма

Блок алгоритма	Комментарии к блоку
«Запрос на исходные данные»	Выполнение запроса к БД с целью получения необходимой информации.
«Выборка исходных данных»	Поток требуемой информации, являющийся ответом на запрос к БД.
«Обработка и подготовка исходных данных в соответствии с требованиями моделирования»	Выполнение операций подготовки данных – внесение в модель, изменение зазора, если это необходимо.
«Выбор шага и числа клеток для итераций»	Шаг для итерации влияет на время работы и точность модели при выполнении оптимизации. Достаточную точность обеспечивает шаг, составляющий 10-20% от допустимого диапазона варьирования вектора. Задача может сводиться к поиску оптимальной формы не всех калибров для исследуемого режима, а лишь только в некоторых клетях, например, в клетях черновой группы стана.
«Цикл по выбранным для оптимизации клетям»	Специфика этого блока состоит в правильном выборе направления процесса оптимизации. Для случая обработки всех клеток стана необходимо задавать цикл от предпоследней клетки до первой с целью сохранения итоговой формы калибра в последней чистовой клетки.
«Определение типов и систем калибров, исходных вытяжек, ограничения по вытяжкам и диапазонам варьирования векторов»	Блок предназначен для обработки данных с целью выставления ограничений для диапазона варьирования векторов и предельных вытяжек во всех используемых клетях.
«Цикл по векторам, описывающим калибры»	Согласно теории оптимизации направление движения математической модели не оказывает влияния на результаты. В данном случае выбрано направление оптимизации от первого вектора до последнего (рис. 5).
«Цикл варьирования векторов с заданным шагом»	Задача выбора методики перебора значений векторов с заданным шагом в допустимых пределах была решена. Принято решение варьировать векторы, начиная от базового значения, сначала до верхней границы, а затем до нижней с определением оптимальности коэффициента $K_{нер}$ (рис. 6).

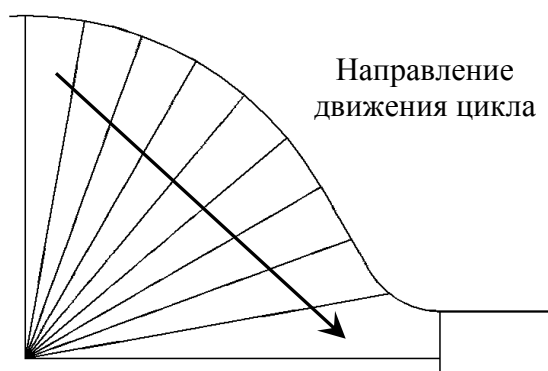


Рис. 5. Цикл оптимизации
по векторам

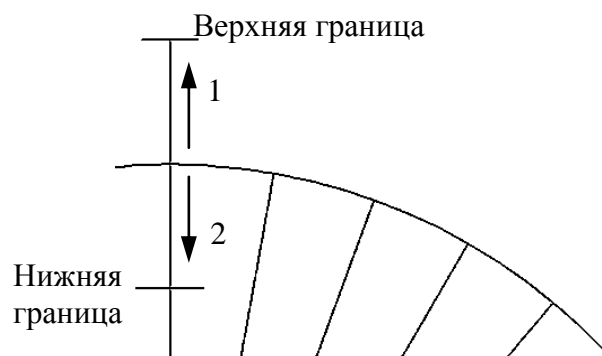


Рис. 6. Порядок изменения значений
длин векторов

Рассмотренный алгоритм позволяет получить рекомендации относительно оптимальной формы калибра. В дальнейшем результаты моделирования должны быть адаптированы в соответствии с правилами построения калибров [11-14].

Совершенствование формы калибров проводили итерационным методом, то есть перебором существующих вариантов и дальнейшим выбором из этого множества решений одного, удовлетворяющего условиям задачи.

Сравнение результатов, полученных таким методом, с результатами по методу Ньютона и методу сопряженных градиентов [16, 17] показало, что отклонение результатов незначительно [3] и составляет менее 1,4%.

Использование модели оптимизации

Процедура проектирования и построения калибровки является достаточно трудоёмкой. Для различных режимов прокатки формируются отличающиеся друг от друга чертежи калибров. Даже для случая прокатки одного профиля, но разных марок стали необходимо производить адаптацию формы калибров и (или) настройку стана.

Известно, что универсальной калибровки валков не существует, поэтому всегда при решении задачи её совершенствования рекомендуется учитывать множество факторов, оказывающих влияние на выбор контуров калибров.

Разработанная математическая модель [3,5-7,18] в качестве таких факторов рассматривает вытяжную способность системы калибров и степень гомотетичности инструмента и объекта ОМД, выраженную через коэффициент неравномерности деформации. Так как невозможно учесть весь спектр возмущающих воздействий, то результаты моделирования требуют адаптации к реальным условиям и правилам построения калибровки.

В качестве основных шагов работы с созданной математической моделью стоит выделить:

- формирование исходных данных;
- определение параметров модели перед оптимизацией;
- порядок проведения расчетов;
- корректировку полученных результатов;
- проверочные расчёты на основе итоговых результатов.

Особенности применения модели

Программная реализация моделирования представлена тремя основными файлами и одним дополнительным. Схема взаимодействия файлов с БД выглядит следующим образом (рис. 7).

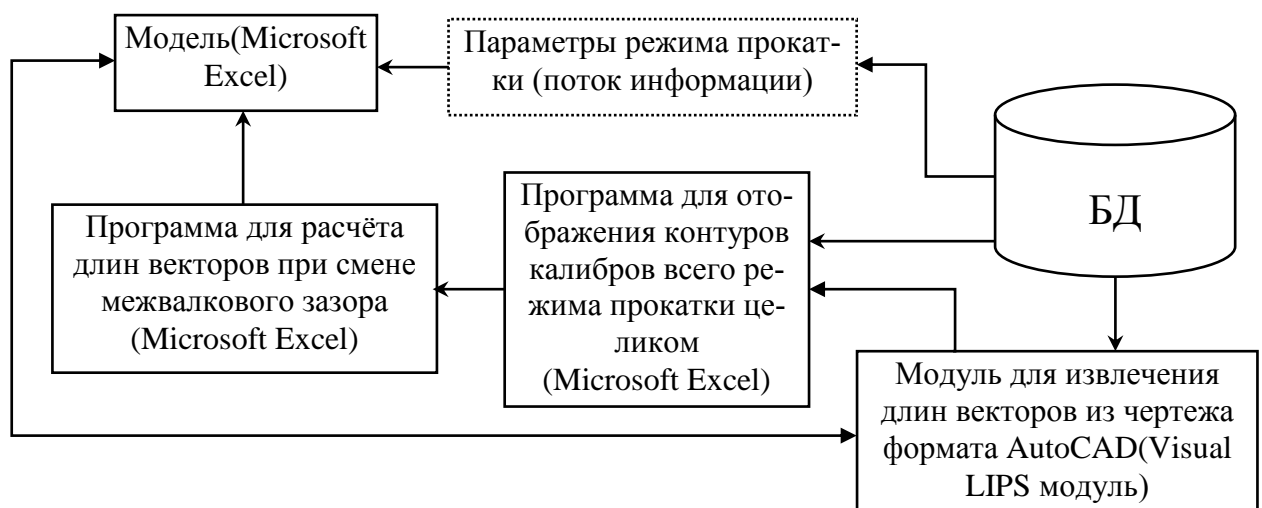


Рис. 7. Взаимодействие математической модели и её модулей с БД

Параметры режима прокатки содержат в себе:

- информацию о названии стана;

- количество клетей;
- чертеж и дополнительные характеристики формы заготовки;
- универсальную ссылку на очередность и характеристику ручьёв калибров, используемых в режиме;
- универсальную ссылку на очередность и характеристику всех используемых в режиме прокатных клетей;
- название профиля;
- название марки стали и базовый предел текучести и другие механические характеристики;
- температуру на выходе из нагревательной печи;
- скорость прокатки в первой рабочей клетю.

Для моделирования, помимо параметров прокатки, нужны также и цифровые модели формы калибров.

Получение оцифрованной формы калибра из БД возможно двумя способами: выбором необходимых векторов, согласно определённому режиму (рис. 8), или извлечением информации о длинах векторов из чертежа при помощи дополнительного модуля (рис. 9).

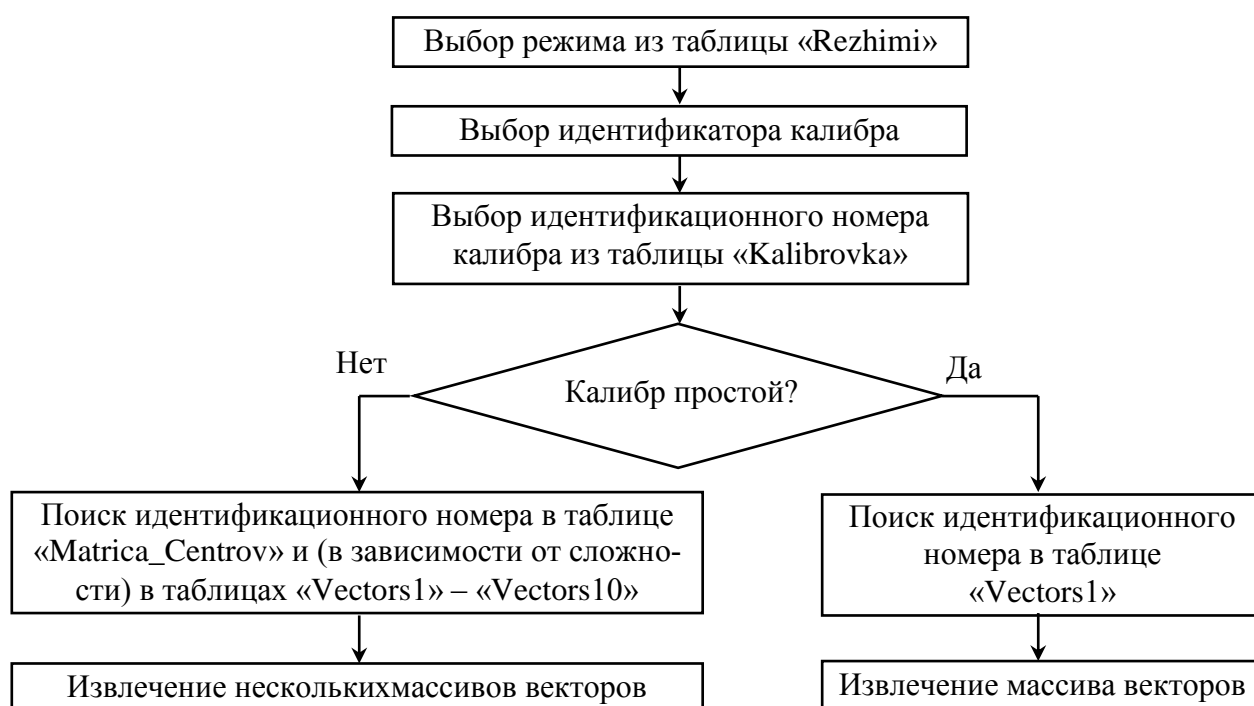


Рис. 8. Алгоритм получения цифровых моделей калибров из БД

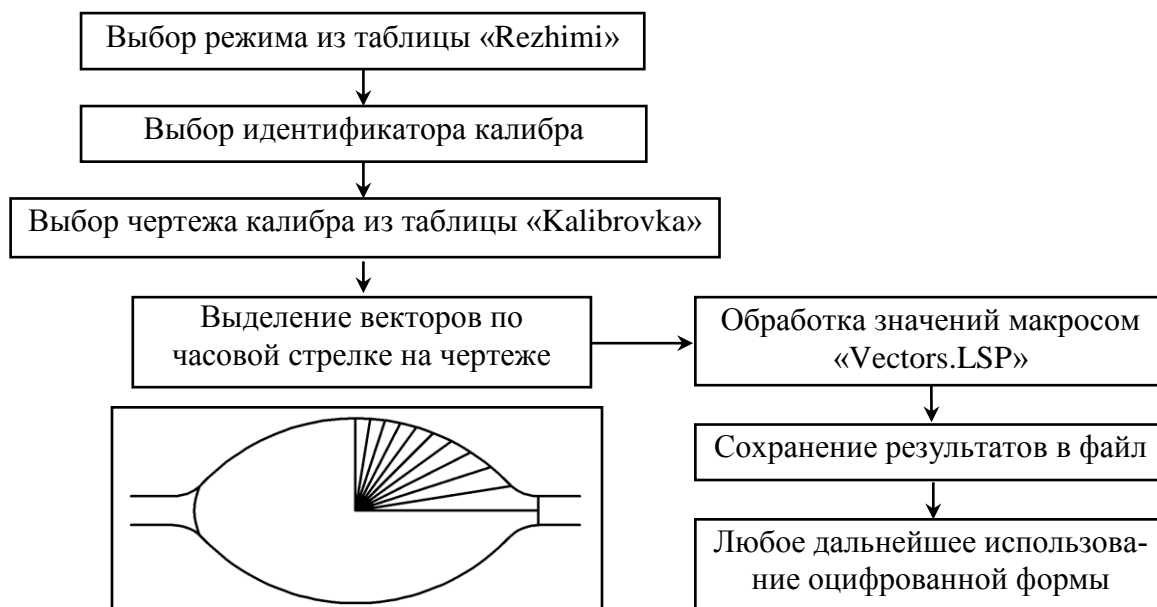


Рис. 9. Проведение оцифровки контура калибра

В процессе работы с математической моделью часто возникает необходимость визуализировать все контуры (или один) калибров (рис. 10).

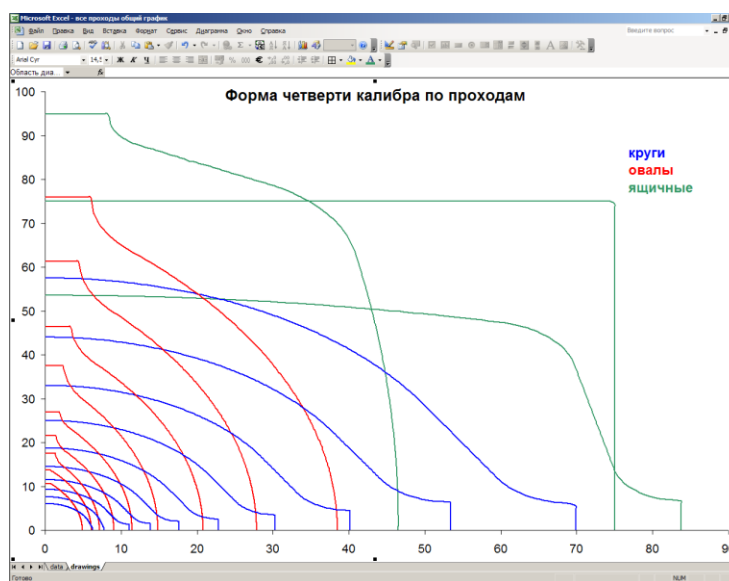


Рис. 10. Окно программы, отображающей контуры калибров

В модели должны быть использованы корректные векторы, характеризующие контур калибра с определенным (согласно режиму прокатки) межвалковым зазором. Для повышения точности данных о зазоре была усовершенствована методика расчёта длин векторов при сведении и разведении прокатных

валков [10]. Методика позволяет с определенной точностью (0,05%) производить вычисления с отображением результатов (рис. 11).

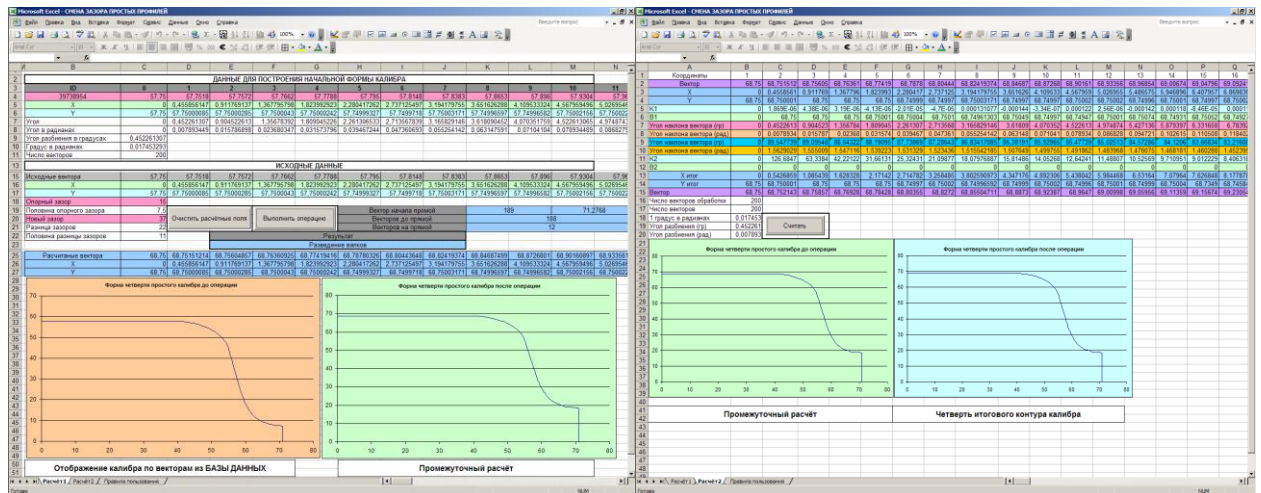


Рис. 11. Окна программной реализации смены межвалкового зазора

Перед началом проведения оптимизации формы калибров необходимо задать исходные данные в модель. К входящей информации относятся:

- основные данные о режиме прокатки (профилеразмер, марка стали, стан, размеры заготовки и т.п.);
- исходные цифровые значения векторов, описывающих контуры калибров и сечение исходной заготовки;
- сведения о диаметрах валков в прокатных клетях режима;
- шаг итераций, выбираемый исходя из необходимой точности;
- диапазон проходов, для которых будет происходить процесс оптимизации;
- направление оптимизации.

Следует отметить, что цифровые значения длин векторов должны быть предварительно подготовлены с учётом корректности межвалкового зазора и с обязательным транспонированием в случае кантовки. Диаметры валков позволяют поставить ограничения в виде максимально и минимально допустимых значений векторов.

При выборе шага итераций рекомендуется устанавливать его значение не менее 2 и не более 15% от диапазона варьирования. Приемлемая точность (0,9% отклонений по разнице площадей сечений) достигается уже при 10%, следовательно, это значение можно принять за номинальное.

Известно, что деление всех клеток непрерывного сортопрокатного стана на подгруппы весьма условно. Принято считать, что существуют три типа подгрупп – черновая, средняя и чистовая. Однако возможно дальнейшее разделение, например, средней подгруппы на первую среднюю, вторую среднюю и третью среднюю. В качестве признаков такого деления можно выделить скоростные (общий привод или отдельный привод на двигатель) и деформационные режимы (вытяжные и формирующие системы калибров). Поэтому при выборе диапазона оптимизации следует учитывать деление на подгруппы исследуемого стана. Так как нужно поддерживать значение суммарной вытяжки в определённых пределах, рекомендуется производить оптимизацию формы калибров по отдельным группам клеток (рис. 12). Такой подход позволяет более эффективно учитывать реальные условия прокатки.

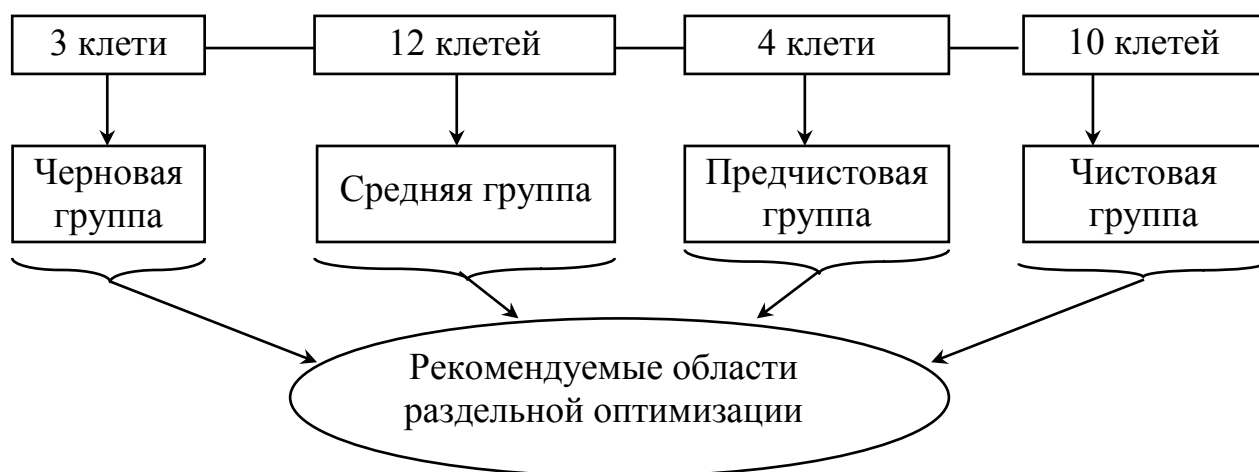


Рис. 12. Использование модели оптимизации на стане 170
ОАО «ММК» при разделении всех клеток на подгруппы

Каждая из подгрупп клеток стана 170 (см. рис. 12) формирует на выходе из последней клетки определённое сечение металлопроката. При проведении оп-

тимизации формы калибра необходимо начинать с последней клетки в подгруппе для обеспечения требуемой геометрии на выходе. Таким образом, движение в сторону, противоположную прокатке, нужно считать правильным направлением работы оптимизационного процесса.

Моделирование режимов прокатки

При расчёте новых контуров калибров для режимов прокатных станов ОАО «ММК» исходными данными являлись потоки информации из разработанной БД технологических параметров сортовых станов (табл. 3). Следует отметить, что разработка новых форм калибров велась параллельно с внедрением нового сортопрокатного комплекса ОАО «ММК», следовательно, расчёты велись как для всё ещё действующих, так и для строящихся станов. Также на основе проведенных исследований предложена новая форма калибров черновой группы клеток стана 350 ОАО «Северсталь».

Таблица 3

Информация об исследованных режимах

Стан	Профилеразмер	Количество оптимизированных проходов
250 №2 ОАО «ММК»	Круг 6,5	14
170 ОАО «ММК»	Круг 6,5	27
	Круг 12	19
370 ОАО «ММК»	Круг 36	10
	Квадрат 22	12
450 ОАО «ММК»	Круг 22	14
	Круг 60	8
350 ОАО «Северсталь»	Круг 36	3

Количество проходов для оптимизации выбирали исходя из условия неизменности калибровки валка последнего формирующего прохода и постоянства контура калибра в первой задействованной прокатной клетки (так как геометрия калибра в первой черновой клетки связана с формой заготовки).

Для ОАО «Северсталь» была решена задача проектирования новой калибровки для трех черновых клетей стана 350 с целью снижения влияния ромбовидности непрерывнолитой заготовки на формоизменение.

В качестве исходных параметров при моделировании всех рассматриваемых режимов были:

- шаг итераций, равный 10%;
- направление, выбрано движение от последней клетки к первой;
- разбиение на подгруппы клетей, согласно принципу общего или раздельного привода прокатных валков.

Результатом исследования путём оптимизации формы калибров являются корректировки 107 его контуров для восьми профилеразмеров на пяти станах. В качестве примера модифицированная калибровка прокатных валков стана 370 ОАО «ММК» для прокатки круга 36 приведена на рис. 13-14 (калибры первого и последнего проходов не отображены).

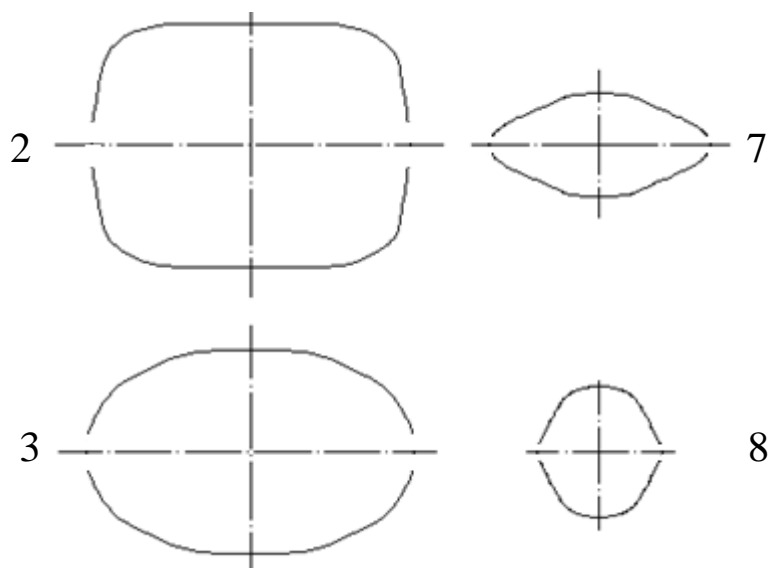


Рис. 13. Предлагаемая на основе исследований калибровка валков стана 370 ОАО «ММК» для прокатки круга 36 (часть 1 из 2)

После проведения работы над изменением калибровки были получены новые расчётные значения $K_{нер}$, а также рассчитаны усилия прокатки.

Процентное снижение $K_{нер}$ для всего режима прокатки

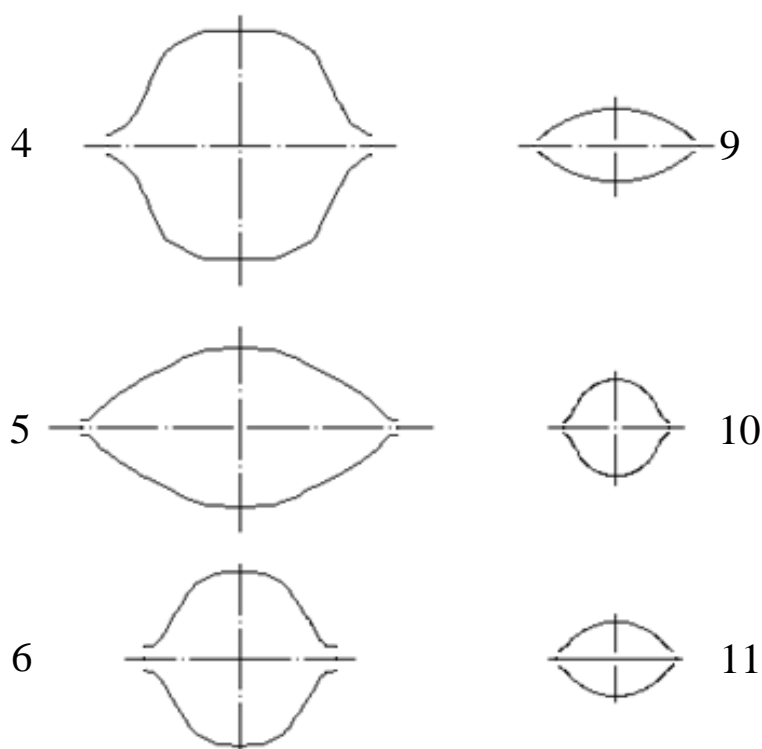


Рис. 14. Предлагаемая на основе исследований калибровка валков стана 370 ОАО «ММК» для прокатки круга 36 (часть 2 из 2)

$$E = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - x'_i)}{x_i}}{k} 100, \quad (14)$$

где k — количество клеток, задействованных при оптимизации;

i — порядковый номер клетки;

x_i — $K_{\text{нер}}$ для i -й клетки до оптимизации;

x'_i — $K_{\text{нер}}$ для i -й клетки после оптимизации.

Анализ калибровки для прокатки круга 12 для стана 170 ОАО «ММК» на эффективность распределения деформаций показал, что существенная неравномерность деформации ($K_{\text{нер}} > 0.25$) наблюдается в проходах 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19 и 20. Изменения на основе модели оптимизации, внесённые в калибровку валков этого режима, позволили снизить неравномерность деформации до приемлемых значений во всех проходах, где величина $K_{\text{нер}}$ превышала 0,25

(рис. 15). Процентное снижение $K_{\text{нер}}$ составило 21%, что позволяет утверждать об эффективности внесенных изменений в калибровку валков.

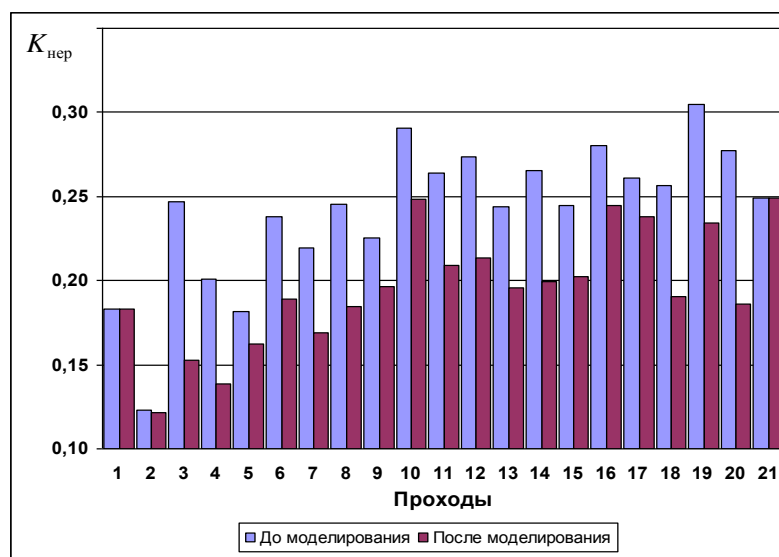


Рис. 15. Диаграмма распределения неравномерности деформации по проходам при прокатке круга 12 на стане 170 ОАО «ММК»

Анализ калибровки для прокатки круга 36 на стане 370 ОАО «ММК» на эффективность распределения деформаций показал, что неравномерность деформации наиболее ярко выражена в проходах 7, 8, 9 и присутствует незначительное её превышение в проходах 1 и 10 (рис. 16). После корректировки калибровки процентное снижение $K_{\text{нер}}$ составило 13% и значения $K_{\text{нер}}$ в проходах 7, 8, 9 и 10 не превышает 0,25, что позволяет утверждать об эффективности внесенных изменений в калибровку валков.

Анализ калибровки для прокатки круга 22 для стана 450 ОАО «ММК» на эффективность распределения деформаций показал, что в этой схеме прокатки существует множество проблем (рис. 17). В проходах 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15 преобладает высокий уровень неравномерности деформации. Незначительные отклонения от рекомендуемого значения коэффициента неравномерности присутствуют в проходах 1, 4 и 16. После проведения процесса оптимизации форм калибров и корректировки полученных данных неравномерность в «проблемных» проходах снизилась до требуемого уровня. Общее процентное снижение $K_{\text{нер}}$ составило 17,5%.

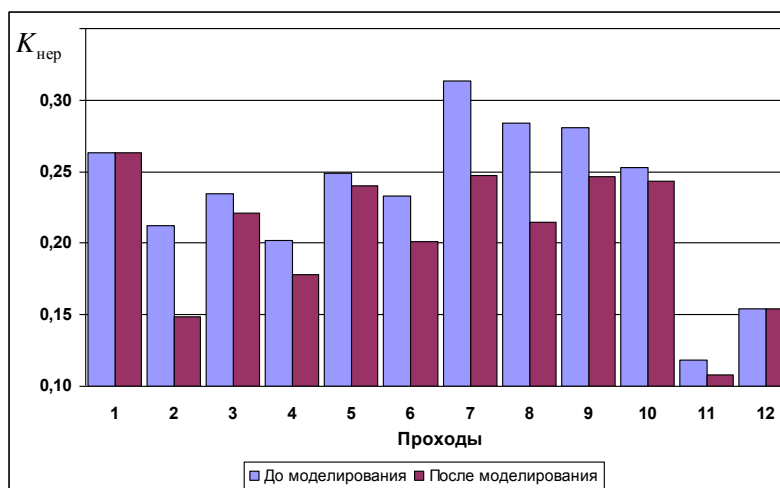


Рис. 16. Диаграмма распределения неравномерности деформации по проходам при прокатке круга 36 на стане 370 ОАО «ММК»

Так как распределение деформации по ширине калибра после его оптимизации меняется, то после рассмотрения результатов эффективности разработанных калибровок нужно провести расчёты нагрузок для откорректированных режимов.

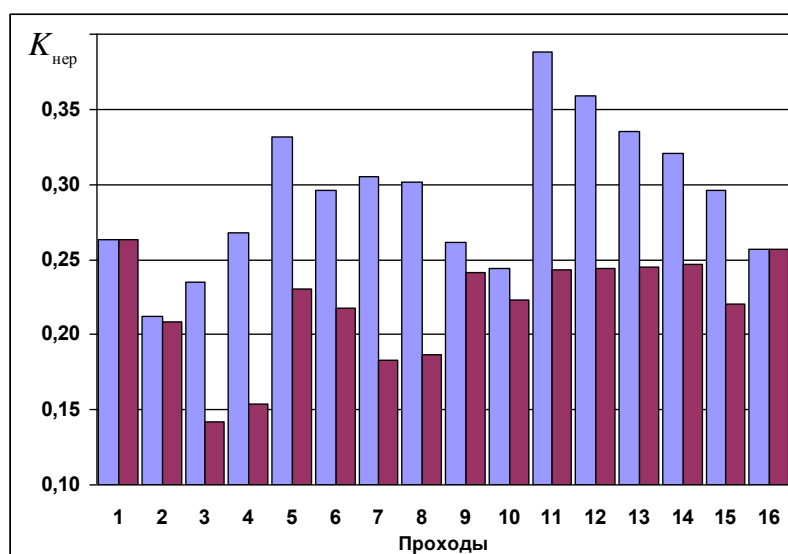


Рис. 17. Диаграмма распределения неравномерности деформации по проходам при прокатке круга 22 на стане 450 ОАО «ММК»

Нагрузки, оказывающие прямое воздействие на оборудование при прокатке, вычисляли по известной методике, предложенной в работах [3, 9, 10].

Дополнительные данные, необходимые для расчёта усилия прокатки, взяты из разработанной БД технологических параметров сортовых станов. Часть результатов по вычислению нагрузок представлена на рис. 18-20.

Общая тенденция снижения энергосиловых параметров (см. рис. 18-20) приводит к существенной экономии электроэнергии. По предварительным оценкам восемь разработанных режимов прокатки позволят сэкономить в среднем 0,6 млн руб. в год.

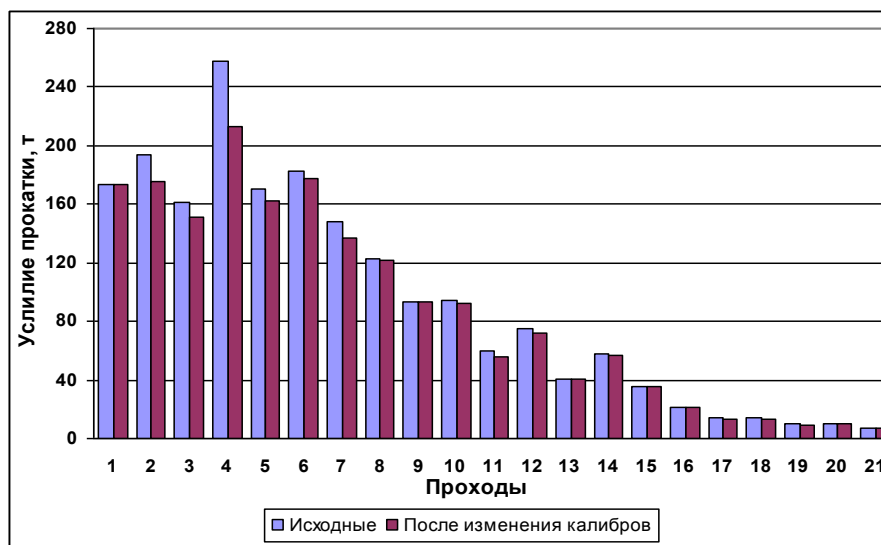


Рис. 18. Диаграмма распределения усилий по проходам при прокатке круга 12 на стане 170 ОАО «ММК»

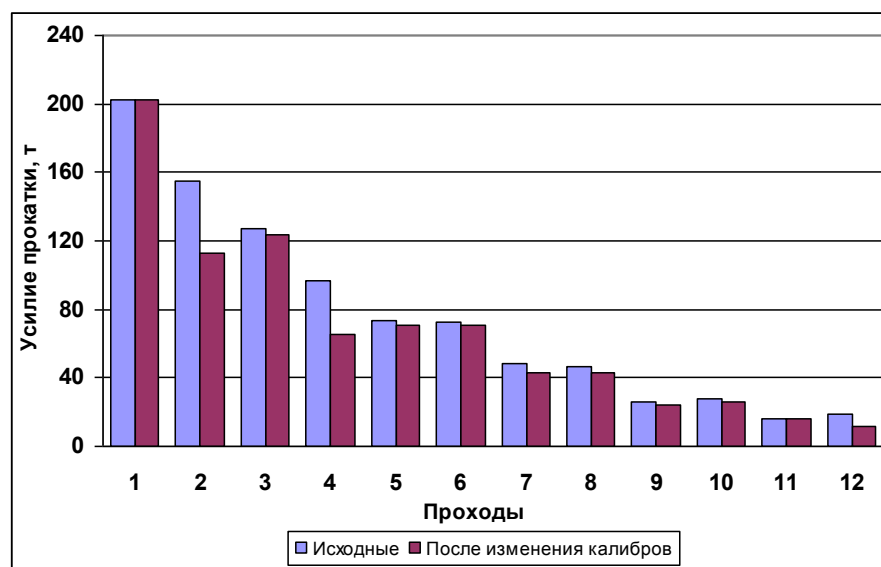


Рис. 19. Диаграмма распределения усилий по проходам при прокатке круга 36 на стане 370 ОАО «ММК»

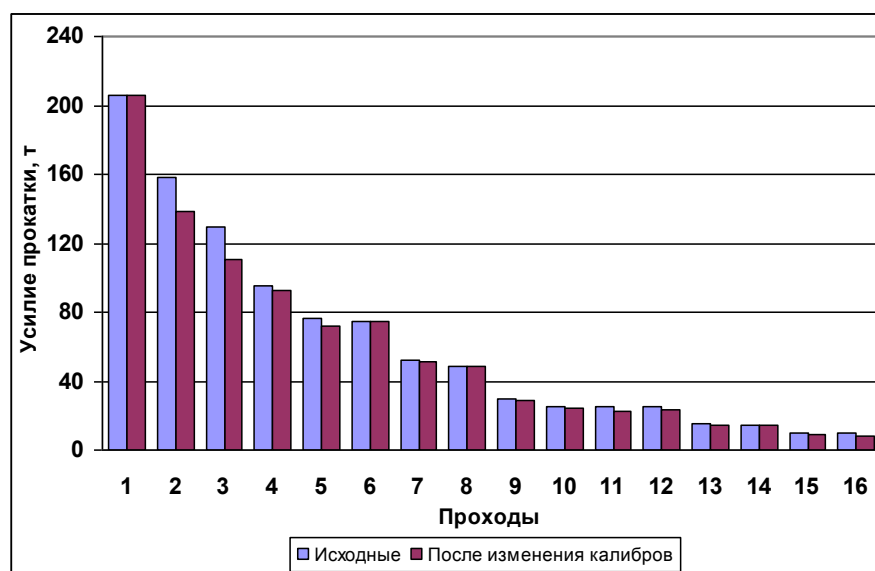


Рис. 20. Диаграмма распределения усилий по проходам при прокатке круга 22 на стане 450 ОАО «ММК»

Помимо использования математической модели для решения задачи совершенствования калибровок на станах 250 №2, 170, 370 и 450 ОАО «ММК» была решена аналогичная задача и для черновой группы клеток стана 350 ОАО «Северсталь». Процентные снижения сумм значений оцениваемых параметров (усилия прокатки и $K_{нер}$) прокатки до и после применения разработанной модели приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Сводная таблица расчётов значений нагрузок

Стан	Профилеразмер	Сумма нагрузок, т		
		до	после	Δ, %
		оптимизации		
250 №2 ОАО "ММК"	Круг 6,5	3598,55	3085,26	-14,26
170 ОАО "ММК"	Круг 6,5	4252,18	3759,61	-11,58
	Круг 12	1944,91	1831,61	-5,83
370 ОАО "ММК"	Круг 36	910,03	808,80	-11,12
	Квадрат 22	1117,52	1023,60	-8,40
450 ОАО "ММК"	Круг 22	995,38	937,54	-5,81
	Круг 60	1026,30	976,28	-4,87
350 ОАО "Северсталь"	Круг 36 (3 клетки)	530,41	521,15	-1,75

В результате проведенных исследований были получены данные на основе моделирования восьми режимов на пяти станах. Изменение калибровки валков в этих режимах позволило значительно (в среднем на 16,2%) снизить неравномерность деформации и уменьшить нагрузки (в среднем на 8%) на оборудование прокатных станов.

Таблица 5

Сводная таблица расчётов значений $K_{нер}$

Стан	Профилеразмер	Изменение $K_{нер}$, %
250 №2 ОАО "ММК"	Круг 6,5	-11,71
170 ОАО "ММК"	Круг 6,5	-17,10
	Круг 12	-21,65
370 ОАО "ММК"	Круг 36	-13,79
	Квадрат 22	-12,62
450 ОАО "ММК"	Круг 22	-17,51
	Круг 60	-6,79
350 ОАО "Северсталь"	Круг 36 (3 клетки)	-28,71

Для усовершенствованных режимов получены расчётные значения вытяжек, логарифмические суммы которых отклоняются от нормированных значений данных показателей не более чем на 1%, что свидетельствует о достаточной точности используемой математической модели.

В результате исследований получены следующие результаты.

Разработана БД технологических параметров сортовых станов, отвечающая современным требованиям СМК по автоматизации, анализу и систематизации производства и по сопровождению готовой продукции. Отличительной особенностью БД является возможность анализа и учёта закономерностей технологического процесса производства сортового проката, влияющих на геометрию и свойства готовой продукции.

Усовершенствованы элементы структурно-матричного моделирования технологических процессов прокатки (учёт изменения зазора, вид описания, применение критерия неравномерности деформации). Проведён анализ режимов сортовых станов ОАО «ММК» и предоставлен комплекс рекомендаций по следующим профилям: круглая сталь 6,5 и 12 мм (стан 170); круглая сталь 36 мм и квадратная сталь 22 мм (стан 370); круглая сталь 22 и 60 мм (стан 450). На основе разработанной модели оптимизации по данным режимам смоделированы новые формы калибров.

В соответствии с основными принципами управления качеством стандартов ИСО серии 9000:2000 предложен общий подход к управлению качеством сортовой продукции с помощью технических и технологических групп воздействия. Он заключается в разработке и программной реализации математической модели получения оптимальной формы калибров с минимальным значением коэффициента неравномерности деформации. Совместное использование структурно-матричного подхода и элементов теории оптимизации позволило разработать инструмент управления качеством геометрии сортовой продукции и реализовать его в виде программных средств.

При помощи созданных программных средств произведено моделирование режимов прокатки на пяти различных станах. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемых методик совершенствования контуров калибров, позволяют снизить затраты энергии (в среднем на 3%) и повысить результативность сортопрокатных станов, увеличив срок службы основного сменного оборудования. Снижение коэффициента неравномерности деформации (в среднем на 16,24%) позволило уменьшить дефектность готовой продукции. Разработанная математическая модель оптимизации формы калибров является дополнением к инструменту управления качеством продукции и процессом прокатки на этапах проектирования и производства. Таким образом, усовершенствованный инструмент СМК обеспечивает поддержание и повышение качества согласно принципам стандартов ИСО серии 9000:2000.

На сегодняшний момент времени ведутся исследования в направлении интеграции преимуществ математических моделей [19-22] с различными критериями оптимизации для получения многокритериальной задачи оптимизации и, как следствие, более эффективных форм калибров прокатных валков.

Библиографический список

1. Тулупов О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортов прокатки: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 224 с.
2. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: Дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 404 с.
3. Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н. Оптимизация режимов формоизменения на современных непрерывных сортовых станах // Наука и производство Урала: Сб. тр. межрегион. науч. конф. студентов, аспирантов и молод. уч. Новотроицк: НФ МИСиС, 2005. С. 55-57.
4. Левандовский С.А., Кобзева Е.С., Моллер А.Б. Повышение эффективности процессов сортовой прокатки за счёт оптимизации режимов формоизменения // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всероссийской. науч.-техн. конф. молодых ученых 8-11 декабря 2005 г. Часть 3. Новосибирск: НГТУ, 2006 С. 23-24.
5. Левандовский С.А. Оптимизация режимов формоизменения на современных непрерывных сортовых станах // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых учёных ВУЗов Челябинской области: Сб. рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. С. 131-132.
6. Левандовский С.А., Моллер А.Б. Оптимизация режимов сортовой прокатки, повышающая качество готовой продукции // Тез. докл. 6-й междунар.

науч.-техн. конф. молодых специалистов. 17-22 апреля. Магнитогорск: ММК, 2006. С. 72-74.

7. Совершенствование существующих технологических схем прокатки на основе оптимизации форм калибров с целью повышения качества сортовой продукции / С.А. Левандовский, А.Б. Моллер, Д.В. Назаров, А.А. Зайцев // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: МГТУ, 2006. С. 129-137.

8. Тулупов С.А., Тулупов О.Н., Зайцев А.А. Структурно-матричное описание калибровки фланцевых профилей. Магнитогорск. гос. горно-металлург. акад. Магнитогорск, 1995. 18 с. Деп. в ВИНТИ 23.01.96., №264-B96.

9. Развитие матричного подхода к описанию процессов ОМД с целью адаптивного управления формоизменением / С.А. Тулупов, О.Н. Тулупов, А.Б.Моллер, А.А. Зайцев // Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века: Тез. докл. Межгосударств. науч.-техн. конф. 14-17 мая 1996 г. Магнитогорск. С. 67-68.

10. Моллер А.Б. Адаптируемая матричная модель для повышения точности непрерывной сортовой прокатки: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорская горно-металлургическая академия им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 1996. 158 с.

11. Бахтинов Б.П., Штернов М.М. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургиздат, 1953.

12. Чекмарёв А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургия, 1971. 509 с.

13. Мутьев М.С. Калибровка черновых валков. М.: Металлургия, 1964. 191 с.

14. Смирнов В.С., Богоявленский К.И., Павлов Н.Н. Калибровка прокатных валков по методу соответственной полосы. М.: Металлургиздат, 1953. 328 с.

15. ГОСТ 30136-94. Катанка из углеродистой стали обыкновенного качества. Издательство стандартов, 1995.

16. Методы моделирования настройки сортопрокатных станов / С.А. Левандовский, А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.А. Зайцев // Труды междунар. науч.-техн. конф. 20-22 сентября 2005 г. Санкт-Петербург. С. 66-69.

17. Гитман М.Б., Трусов П.В., Федосеев С.А. Стохастическая оптимизация процессов обработки металлов давлением // Изв. РАН. Металлы. 1996. №3. С. 72-76.

18. Моллер А.Б., Левандовский С.А., Тулупов О.Н. Оптимизация режимов формоизменения на современных непрерывных сортовых станах // Наука и производство Урала: Сб. тр. межрегиональной науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Новотроицк: НФ МИСиС, 2005. С. 55-57.

19. Оптимизация формы вытяжных калибров Кинзин Д.И. // Калибровочное бюро. 2013. № 1. С. 20-28.

20. Разработка методики расчета уширения при прокатке в калибрах простой формы Кинзин Д.И. // Калибровочное бюро. 2013. № 1. С. 4-19.

21. Кинзин Д.И. Расчет формоизменения металла при прокатке на основе закона наименьшего сопротивления // Новые материалы: получение и технологии обработки: Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2001. С. 208.

22. Левандовский С.А. Повышение результативности сортовых станов путём совершенствования модели управления качеством: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 150 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПРОКАТА НА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ

В статье представлен развивающийся и активно применяющийся на кафедре ОМД МГТУ им. Г.И. Носова математический подход к моделированию нагрузок и деформаций валковых систем кварто. С использованием разработанного математического аппарата были определены нагрузки и деформации валковых систем, а также разработаны соответствующие поправки к базовым профилировкам валков для условий производства подката двойной ширины для жести и широких полос в условиях преимущественного производства узких.

Ключевые слова: кварто, листовая прокатка, профилирование валков, поперечная разнотолщинность, плоскостность, деформация валковых систем.

Математическое моделирование физических процессов и объектов является одним из наиболее оперативных и эффективных способов решения ряда научных и производственных задач.

Математическое моделирование валковых систем подразумевает определение в них величины и распределения упругих деформаций по длине бочки во взаимосвязи вызвавших эти деформации сплошных нагрузок (межвалковых давлений и давлений обжимаемой полосы). В самом общем виде решение такой задачи требует описания трехмерного упругого деформирования валков и пластического формоизменения полосы. Такое решение при современном уровне развития теории упругости, пластичности и компьютерной техники возможно, однако с точки зрения решения производственных задач рассмотрение лишь

контактных взаимодействий на основании теории упругости является достаточным.

Учитывая сказанное, на кафедре ОМД МГТУ им. Г.И. Носова уже на протяжении более сорока лет успешно развивается и применяется математическое моделирование валковых систем кварто [1, 2]. Данная методика базируется на гипотезе о симметричности нагрузок и деформаций валковых систем относительно вертикальной оси клетки. Асимметрия расчетной схемы относительно горизонтальной оси обусловлена возможностью различной начальной профилировки и разных длин контакта верхних и нижних валков (рис. 1). При этом рассматриваются вертикальные упругие перемещения осей и контактных образующих валков как балок с использованием теории сопротивления материалов, элементов теории упругости и пластичности. Неизвестные погонные нагрузки аппроксимированы кусочно-линейно. В качестве математического аппарата использована алгебра матриц, что позволяет исходные и расчетные величины, распределенные по длине бочки, описывать с помощью многомерных матриц-столбцов (векторов).

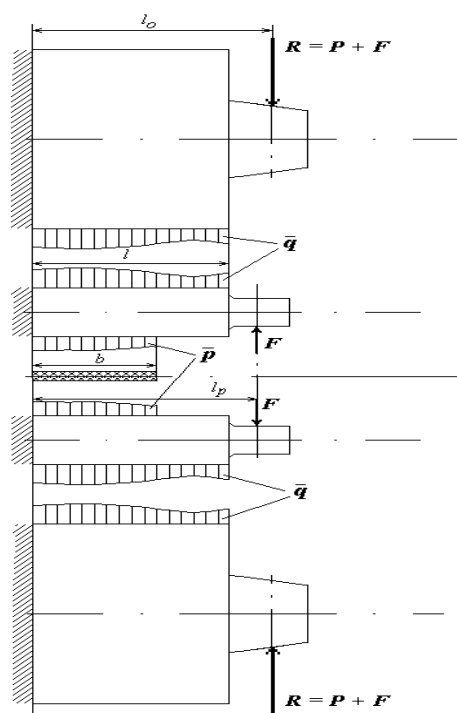


Рис. 1. Расчетная схема нагружения валковой системы кварто

Математическая модель представлена системой уравнений [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_{P1} = \bar{y}'_{P1} + M_{A1}(\bar{z}_{P1} + \bar{z}_{O1} + \bar{y}_{P1} + \bar{y}_{O1}) + M_B(\bar{y}_{P1} + \bar{y}_{P2} - \bar{z}_{P1} - \bar{z}_{P2} - \delta\bar{H}); \\ \bar{y}_{P2} = \bar{y}'_{P2} + M_{A2}(\bar{z}_{P2} + \bar{z}_{O2} + \bar{y}_{P2} + \bar{y}_{O2}) + M_B(\bar{y}_{P1} + \bar{y}_{P2} - \bar{z}_{P1} - \bar{z}_{P2} - \delta\bar{H}); \\ \bar{y}_{O1} = \bar{y}'_{O1} + M_1(\bar{z}_{P1} + \bar{z}_{O1} + \bar{y}_{P1} + \bar{y}_{O1}); \\ \bar{y}_{O2} = \bar{y}'_{O2} + M_2(\bar{z}_{P2} + \bar{z}_{O2} + \bar{y}_{P2} + \bar{y}_{O2}); \\ \bar{p} = \frac{P}{b} \bar{1} - B(\bar{y}_{P1} + \bar{y}_{P2} - \bar{z}_{P1} - \bar{z}_{P2} - \delta\bar{H}); \\ \bar{q}_1 = \frac{P+F}{l} \bar{1} + A_1(\bar{z}_{P1} + \bar{z}_{O1} + \bar{y}_{P1} + \bar{y}_{O1}); \\ \bar{q}_2 = \frac{P+F}{l} \cdot \bar{1} + A_2(\bar{z}_{P2} + \bar{z}_{O2} + \bar{y}_{P2} + \bar{y}_{O2}); \end{array} \right.$$

$$\delta\bar{h} = \left[E - \frac{K_{\mathcal{E}}}{K_C} A_E \right] (\bar{y}_{P1} + \bar{y}_{P2} - \bar{z}_{P1} - \bar{z}_{P2}) + \frac{K_{\mathcal{E}}}{K_C} A_E \delta\bar{H};$$

$$\text{где } \bar{y}'_{P1,2} = \Gamma_P \left(\frac{P+F}{l} \bar{1} - \frac{P}{b} \bar{1} \right) - F \bar{v};$$

$$M_{A1} = \Gamma_P A_1; \quad M_{A2} = \Gamma_P A_2; \quad M_B = \Gamma_P B;$$

$$\bar{y}'_{O1,2} = \Gamma \frac{P+F}{l} \bar{1} + \bar{y}_{OR}; \quad M_1 = \Gamma A_1; \quad M_2 = \Gamma A_2.$$

Представленная математическая модель была использована для решения двух актуальных производственных задач.

Первая задача связана с изменением схемы производства жести на ОАО «ММК»: взамен прокатки на стане 2000 узкого подката шириной 760-910 мм было принято решение о производстве на этом стане подката двойной ширины (1495-1790 мм) с последующим его роспуском после травления на агрегате резки в ЛПЦ-3. При этом необходимо было обеспечить получение минимальной поперечной разнотолщинности подката (0,00-0,02 мм) с сохранением плоскостности и устойчивости полос при прокатке на стане 2000.

Вторая задача связана с необходимостью производства широких (1800-2300 мм) полос в условиях преимущественного производства узких (до 1250

мм) на стане 2500 горячей прокатки ОАО «ММК». При этом упор делался именно на получение удовлетворительной плоскостности проката.

Методика решения задач сводилась к двум основным этапам:

– анализ профиля – отыскание профиля выходящей из клетки полосы по известным профилям валков и входному профилю – использовался для адаптации математической модели к условиям действующего стана и проверки ее адекватности;

– проектирование профилей валков – отыскание таких текущих и начальных профилей валков, которые обеспечили бы получение требуемого выходного профиля полосы при заданном входном.

Общеизвестно, что при проектировании новой системы профилирования валков необходимо учитывать ряд факторов, оказывающих значимое влияние на формирование поперечного профиля и плоскостности полос. С этой целью на соответствующих участках листопрокатных цехов был осуществлен ряд замеров.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты замеров тепловой выпуклости валков чистовой группы станов 2000 и 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» [3, 4].

Таблица 1

Тепловая выпуклость рабочих валков стана 2000 горячей прокатки, мм

Номер клетки						
7	8	9	10	11	12	13
+0,32	+0,29	+0,21	+0,23	+0,16	+0,13	+0,10

Таблица 2

Тепловая выпуклость рабочих валков стана 2500 горячей прокатки, мм

Номер клетки						
5	6	7	8	9	10	11
+0,24	+0,24	+0,22	+0,20	+0,20	+0,18	+0,16

Замеры температур поверхности бочки опорных валков не выявили значимого градиента, соответственно можно говорить об отсутствии тепловой выпуклости на опорных валках.

В то же время значительным является влияние износа опорных валков из-за его сильного воздействия на работу (деформации, прогибы) всей валковой системы, а, следовательно, на профиль и плоскостность. Характерные профили износа опорных валков чистовых групп станов представлены на рис. 2 и 3.

Из рисунков видно, что профили износа опорных валков последних клетей качественно повторяют друг друга. Износ же валков в первых клетях стана 2000 имеет максимум на краях бочки, в то время как на стане 2500 максимум наблюдается в центральной части. Это связано в первую очередь с различием жесткости валковых систем.

С использованием представленных данных осуществлялась адаптация модели к каждому из станов с последующей проверкой ее адекватности.

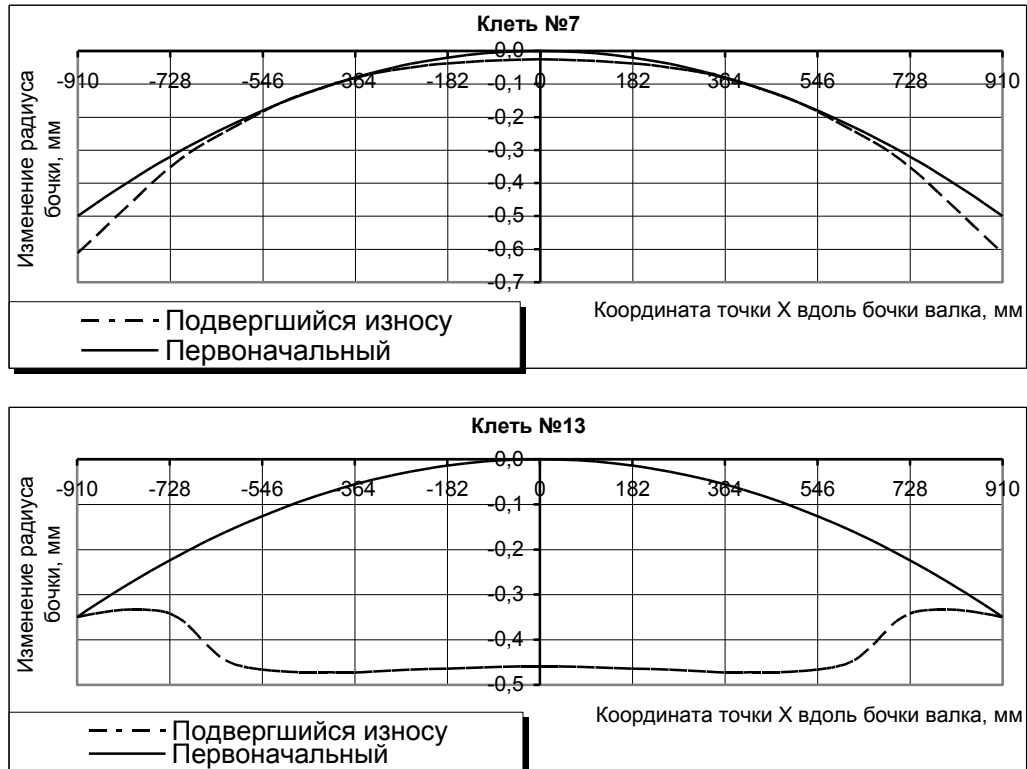


Рис. 2. Первоначальные и подвергшиеся износу профили опорных валков клетей №7 и №13 стана 2000 горячей прокатки

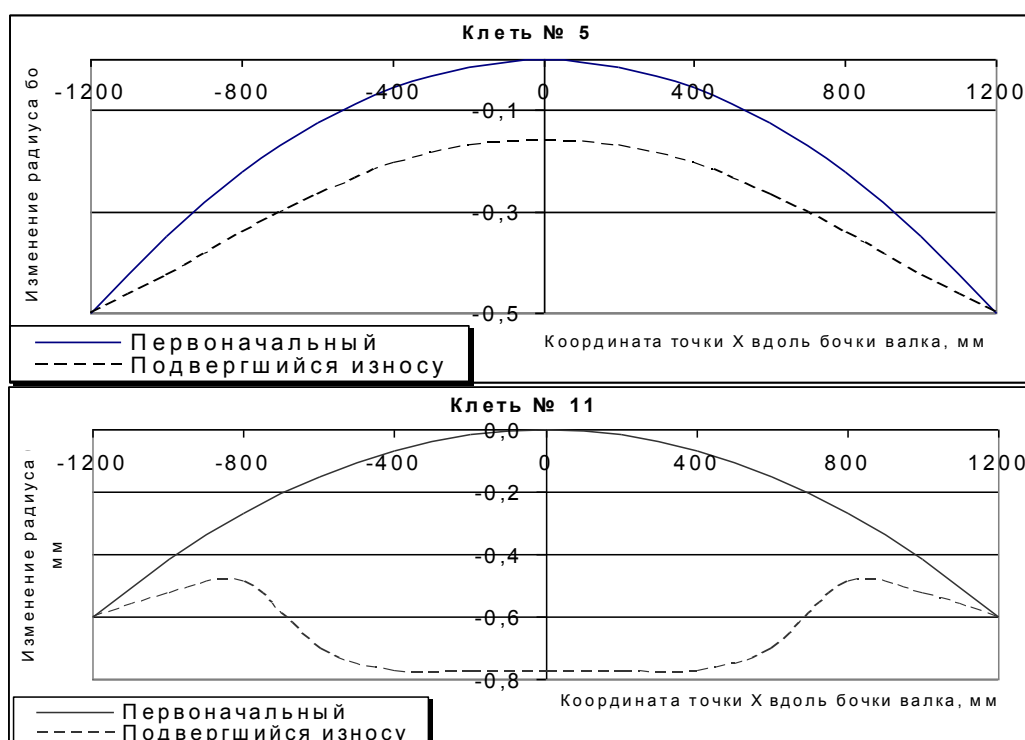


Рис. 3. Первоначальные и подвергшиеся износу профили опорных валков
клетей №5 и №11 стана 2500 горячей прокатки

Численные эксперименты с использованием адаптированной модели полностью подтвердили наблюдаемую картину распределения величин поперечной разнотолщинности на соответствующих листопркатных станах. Данное распределение в качестве примера приведено для условий стана 2000 горячей прокатки (рис. 4).

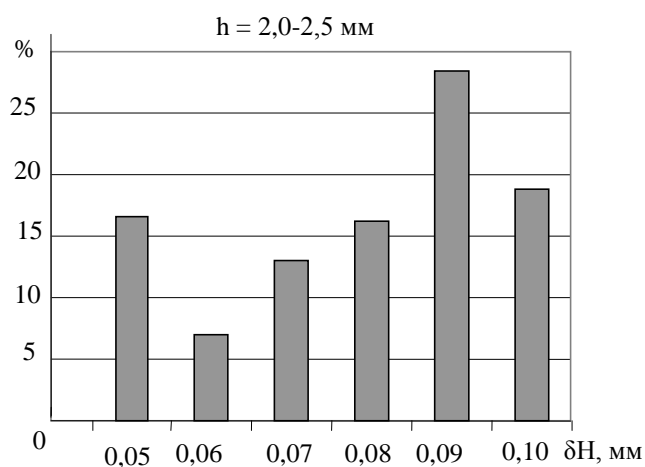


Рис. 4. Гистограмма величины поперечной разнотолщинности горячекатаных полос шириной 1400-1798 мм по данным ЦЛК
ОАО «ММК»

Следующим этапом выполненных работ являлось проектирование новых рациональных профилировок рабочих валков при средних значениях уставок систем гидромеханического регулирования профиля. Пример распределения основных расчетных и искомых величин представлен на рис. 5.

Полученные численные значения профилей были представлены в зависимости от соответствующей профилировки валков для основного сортамента стана. Такой подход позволяет учесть состояние опорных валков чистовой группы на стане на момент прокатки полос, так как подобранная профилировка на определенный момент кампании позволяет наиболее полно учесть степень их изношенности. Таким образом, предложено по фактической профилировке рабочих валков, успешно используемой при прокатке основного сортамента полос, косвенно судить об износе опорных валков.

Поправки относительно базовой системы профилирования представлены для условий производства подката двойной ширины для жести (стан 2000 горячей прокатки)(табл. 3) и широких полос (стан 2500 горячей прокатки) (табл. 4).

Таблица 3

Предлагаемые поправки к профилировкам рабочих валков
для производства подката двойной ширины для жести, мм

Клеть						
7	8	9	10	11	12	13
+0,45	+0,40	+0,35	+0,35	+0,35	+0,25	+0,20

Кроме того, в результате проведенных исследований были предложены дополнительные рекомендации:

– при производстве подката двойной ширины для жести в условиях стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» – это прокатка подката при наработке на рабочих валках клетки №6 – не более 10000 т металла, наработке на опорных валках клетей №12-13 не более 50000 т;

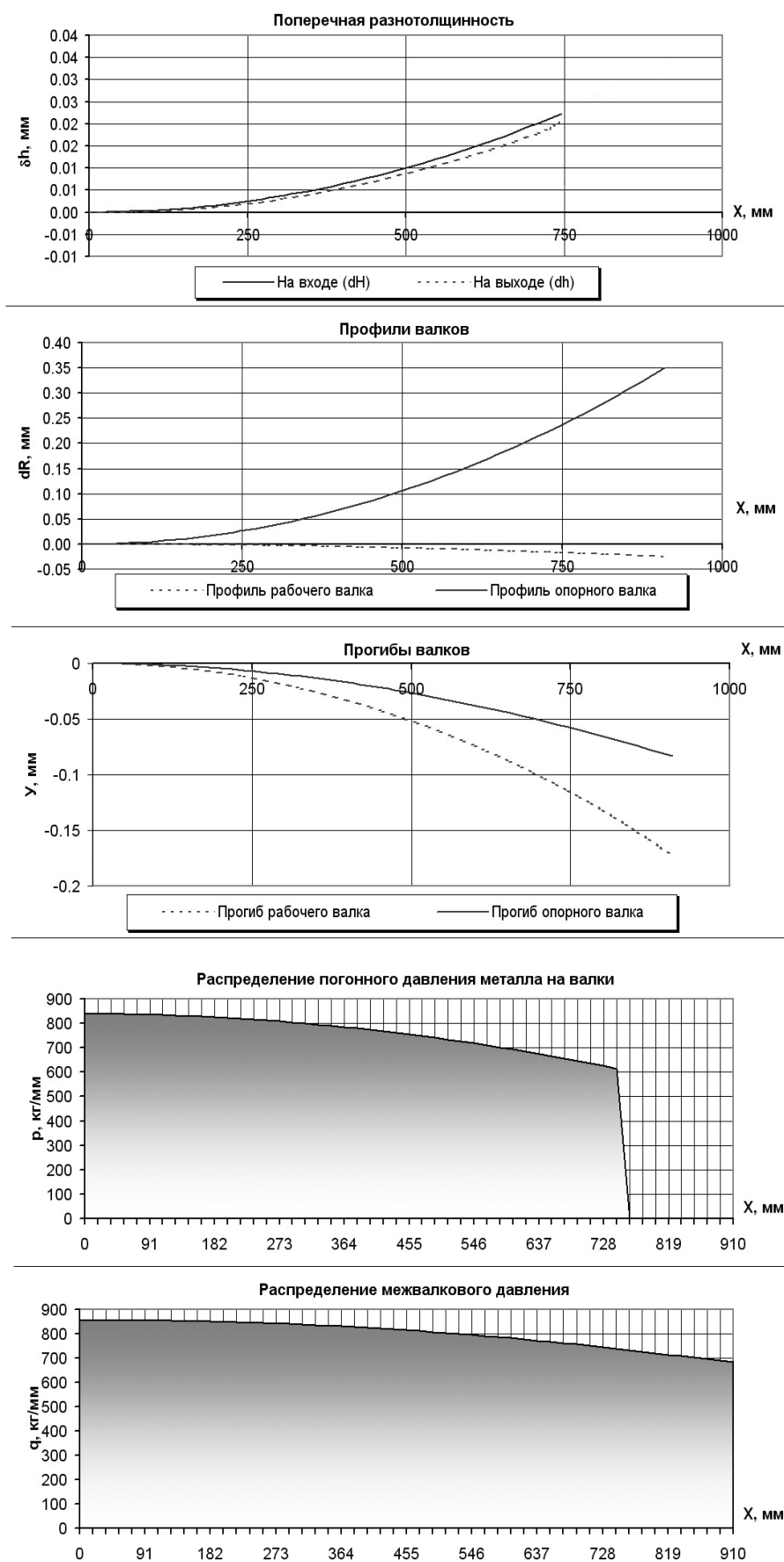


Рис. 5. Распределение основных характеристик при прокатке полосы 2,5×1515 мм из стали 08ПС в 13-й клетки на неизношенных опорных валках

Таблица 4

Поправки к профилировкам рабочих валков
при прокатке полос шириной 1800-2300 мм, мм

При прокатке	Клеть						
	5	6	7	8	9	10	11
трубной заготовки	0	0	+0,10	+0,10	0	-0,20 – на опорные валки при наработке до 30 тыс. т; -0,10 – то же до 50 тыс. т; 0 – то же до 85 тыс. т	–
подката для автолиста	0	+0,10	0	+0,10	0	+0,10	0 – при новых опорных валках; +0,20 – при наработке до 30 тыс. т; +0,40 – то же до 50 тыс. т

– для производства широких (1800-2300 мм) полос в условиях стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» – это прокатка при наработке на рабочие валки клетей №2 (реверсивной) – не более 10 тыс. тонн, №3 – не более 4 тыс. т рядового металла, а также при наработке на опорных валках клетки № 11 – не более 50 тыс. т (для подката для автолиста).

Таким образом, с использованием оригинальной математической модели нагрузок и деформаций валковых систем кварто удалось решить актуальные задачи:

- снизить величину поперечной разнотолщинности подката двойной ширины для жести на стане 2000 горячей прокатки до уровня 0,00-0,02 мм с сохранением высокой плоскостности и стабильности процесса прокатки;
- обеспечить высокую плоскостность широких полос на стане 2500 горячей прокатки, прокатываемых в условиях преимущественного производства узких.

Библиографический список

1. Salganik V.. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill // Metal Forming 2002. The University of Birmingham, UK, September 9-11, 2002.
2. Салганик В.М., Полецков П.П., Омельченко Б.Я. Моделирование и совершенствование четырехвалковых систем // Труды IV конгресса прокатчиков. г. Магнитогорск, 16-19 октября 2001 г. М.: Черметинформация, 2002. С. 152-154.
3. Анализ технологических возможностей ШСГП 2000 ОАО «ММК» по производству подката для жести двойной ширины с требуемым поперечным профилем / В.М. Салганик, П.П. Полецков, О.В. Синицкий и др. // Материалы 63-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2003-2004 гг.: Сб. докл. Т.1. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 22-26.
4. Повышение плоскостности широких полос на стане 2500 горячей прокатки «ММК» в условиях преимущественного производства узких / В.М. Салганик, П.П. Полецков, А.Г. Соловьев и др. // Труды V конгресса прокатчиков. г. Череповец, 21-24 ноября 2003 г. М.: Черметинформация, 2004. С. 48-51

**ИЗМЕНЕНИЯ ШИРИНЫ СЛЯБА ВАЛКАМИ:
ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ**

На основе известных методик представлены ограничения обычных валков для получения бездефектных концов сляба. Рассмотрены разные вариации вертикальных валков, как практически используемых для редуцирования сляба по ширине на отечественных и зарубежных станах, так и теоретически описанных наукой. Подробно описаны различные функции, которые выполняют рассмотренные валки и области их применения.

Ключевые слова: редуцирование сляба, вертикальные валки, калибры, обрезать, поперечная устойчивость.

После ликвидации связующего звена между сталеплавильным и прокатным переделами – обжимного стана (слябинг, слябинг-блюминг) - задача изменения ширины сляба была возложена на них. Несмотря на то, что одним из эффективных способов регулирования ширины с минимальным количеством обрезки является пресс, проблема выбора способов редуцирования для того или иного предприятия производится с учётом состава оборудования, технических, технологических особенностей производства, его специализации и не имеет однозначного решения [1, 2]. На самих прокатных станах изыскивают новые возможности оправданных временем и подтвердивших свою эффективность, при определённых условиях, высокопроизводительных способов редуцирования, где инструментом обжатия сляба по ширине выступают прокатные валки.

На широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) в настоящее время большее распространение нашли вертикальные валки диаметром 800-1200 мм [3], хотя за редким исключением это число доходит до 2200 мм (стан 1840 за-

вода фирмы «Син ниппон сэйтэцу» в г. Хироката) [4]. Увеличение диаметра приводит к возрастанию обжатия за проход, большему проникновению пластической деформации по ширине полосы и, как результат, к уменьшению концевой обрезки. Так, применение валков диаметром 2200 мм сокращает длину концевых накатов с 600 до 400 мм, при обжатии по ширине до 350 мм. По другим данным при увеличении диаметра валков с 1000 до 2000 мм снижение обрезки происходит лишь на 25% [5].

Повышение захватывающей способности валков

Для того, чтобы получить ровные торцы, обжатие за один проход должно составлять огромное значение. На рис. 1 согласно работе [6] представлены необходимые для образования ровных торцов значения обжатий для сляба 1150 мм при двух углах захвата отдельно для переднего ($\Delta b_{\text{п}}$) и заднего ($\Delta b_{\text{з}}$) концов в зависимости от отношения радиуса валков к начальной ширине полосы (R/b_0). Здесь же представлены значения необходимого обжатия для проникновения пластической деформации на всю ширину полосы ($\Delta b_{\text{пл}}$) рассчитанное согласно работе [7] и максимально возможное вертикальное обжатие по углу захвата ($[\Delta b]_{\alpha}$).

Из рисунка видно, что достигнуть получения ровных концов как передних и тем более задних даже при значениях диаметра валка 2200 мм не получается, т.к. в этом случае для переднего конца нужное обжатие должно равняться примерно 260 мм, для заднего – 620 мм, а возможное обжатие при угле захвата 20° составляет всего лишь 130 мм. Увеличение угла захвата до 30° даёт возможность получить уже выпуклый передний конец, но для заднего конца это ничего не решает. Хотя общая тенденция снижения концевой обрезки при увеличении значений редуцирования ширины сляба наблюдается [6].

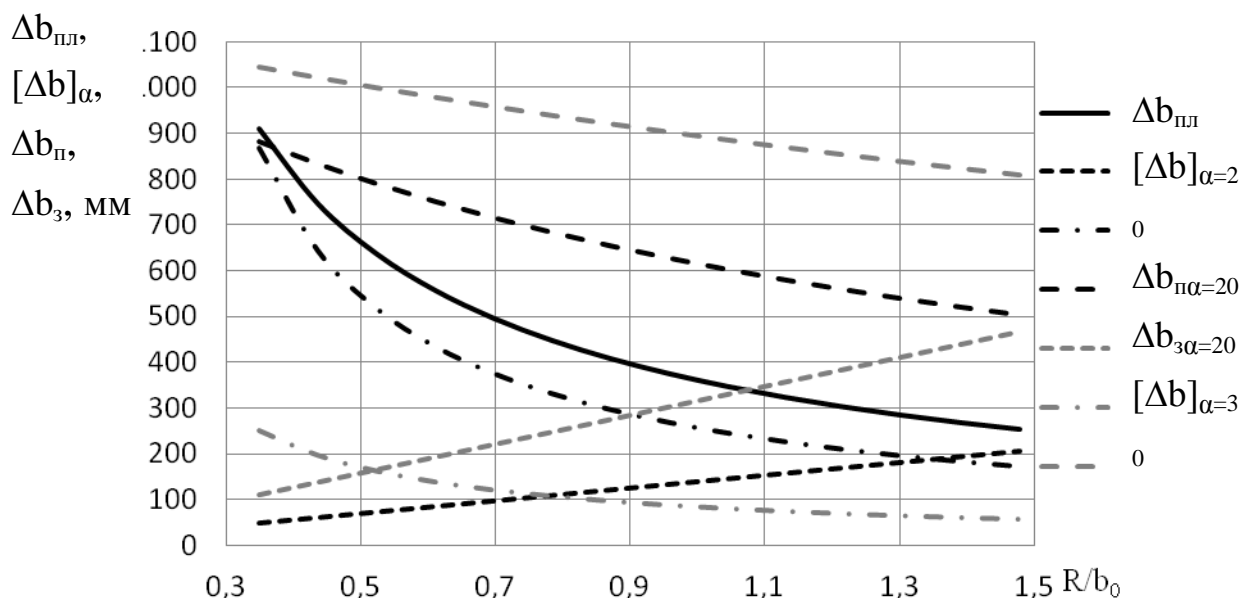


Рис. 1. Проникновения пластической деформации, обжатия для получения ровных торцов и максимальное обжатие вертикальными валками по углу захвата в зависимости от параметра R/b_0

Несмотря на то, что увеличение угла захвата в пределах одного и того же диаметра вала противоречиво влияет на обрезь раската (обрезь переднего конца снижается, а заднего сначала растёт и начинает снижаться тогда, когда передний торец из вогнутого становится выпуклым). Попытки повысить его предпринимались изменением поперечного сечения бочки вала. Угол захвата обычных цилиндрических валков, в поперечном сечении представляющих собой круг, в зависимости от материала изготовления, чистоты поверхности, скорости прокатки и химического состава прокатываемого металла составляет $16-22^\circ$. Для тех же условий применение валков с насечкой повышает захватывающую способность до $26-30^\circ$, но данные валки не применяют к качественным сталям, так как вызывают образование пороков. Чекмарёвым А.П. были предложены многогранные валки (рис. 2). Валки со скошенными гранями (рис. 2, а) имеют предполагаемый угол захвата $18-22^\circ$, валки с вогнутыми гранями до 3 мм (рис. 2, б) – $20-24^\circ$, при вогнутости до 5 мм – $24-30^\circ$, валки с выступами (рис. 2, в) до 4 мм – $20-32^\circ$ и при выступах до 5 мм – $32-38^\circ$ [8].

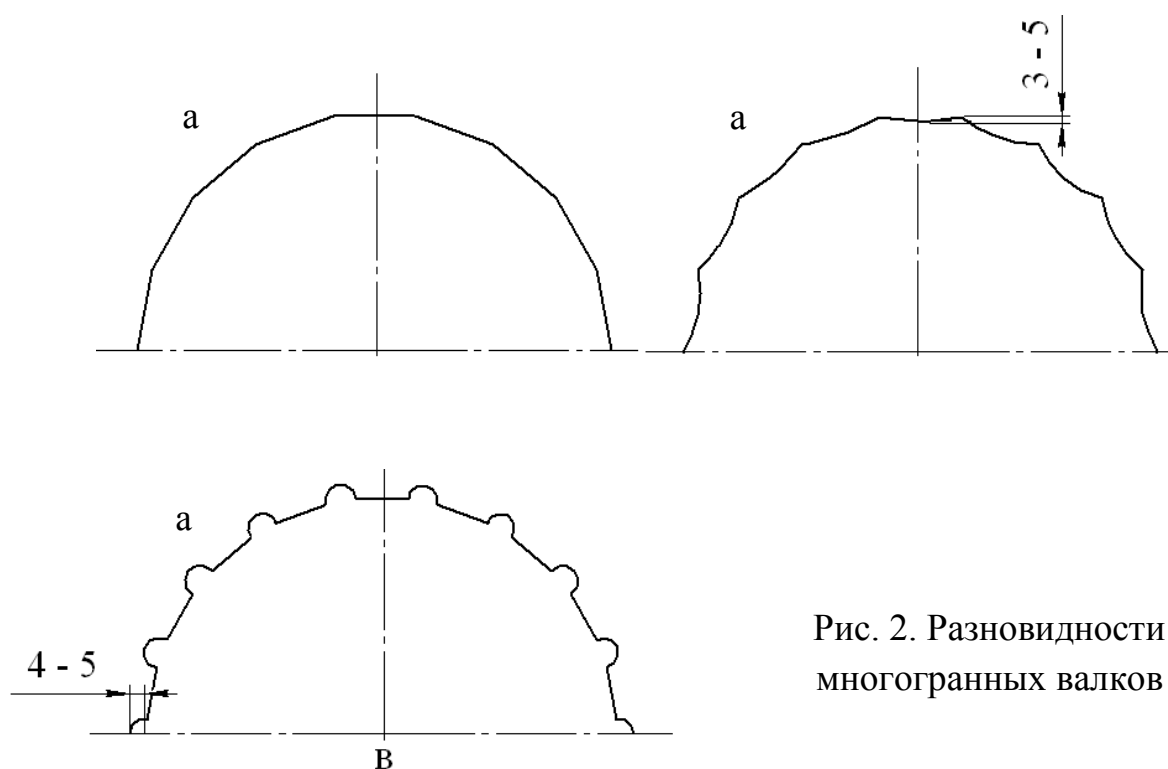


Рис. 2. Разновидности многогранных валков

Автор рекомендует производить обработку валков на обычном вальцетокарном станке с особым суппортом, но в связи с отсутствием специальных станков гофрированные валки (рис. 2, в) были произведены наплавкой с высотой выступов до 3 мм и шагом 75-80 мм. Опыт эксплуатации показал хорошую захватывающую способность таких валков и выявил сильные вибрации, возникающие во время прокатки, что вредно отражается на шпинделях, шестернях и главном двигателе. После 8 ч работы появились трещины, которые росли и могли вызвать поломку валка, а на самих бляхах появились заметные вмятины, что ухудшало качество рельсов [9].

Следующим решением увеличения бокового обжатия в 2-3 раза или в 1,5-2,5 раза от толщины раската является изменение угла наклона валков до 5° с помощью червячных пар или гидроцилиндров по ходу и против движения полосы (рис. 3). Данный способ предотвращает выпучивания раската, обеспечивает высокую точность прокатки по ширине и улучшает податливость материала, но возникает смещение раската, которое предотвращают установкой роликового проводкового стола или опорного ролика [10, 11].

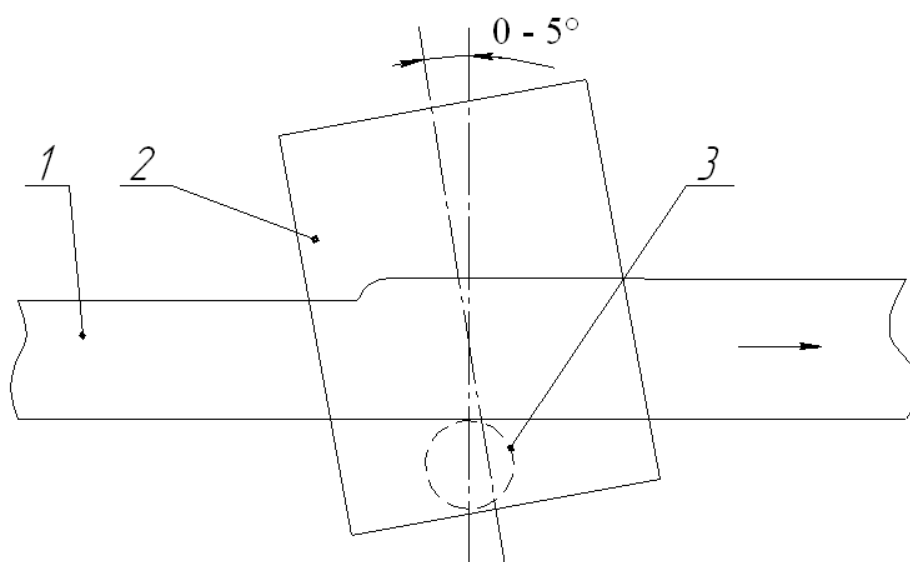


Рис. 3. Регулируемый наклон вертикального вала [11]:

1 – сляб, 2 – вертикальный валок, 3 – опорный ролик

Конические валки и их модификации

Известны также различные модификации конических валков (рис. 4), которые используют с целью увеличения обжатия боковых граней раската, уменьшения наплывов и снижения концевой обрезки [10].

Изначально конический валок (рис. 4, а) был предложен для вертикального вала слябинга с целью повышения обжатий, исключения скручивания раскатов, приводящего к их винтообразованию, разноширинности готовых слябов с наплывами на широких гранях. Образующая бочки конического участка выполнена в виде поверхности второго порядка. Для получения указанных эффектов необходимо соблюдать определённые отношения размеров вала:

$$0,5 \frac{D_1 - D_2}{L_3}; \quad \frac{L_3}{L_2}; \quad \frac{L_2}{L}$$

и др., указанные в работе [12].

На ШСГП с целью повышения выхода годного за счёт уменьшения дефектов на кромках рекомендуют применять конический валок, коническая часть которого оканчивается буртом, состоящим из конической и цилиндрической частей (рис. 4, б). Такое исполнение позволяет уменьшить наплывы ме-

талла на широких гранях, увеличить течение металла в направлении линии прокатки, обеспечить устойчивое формообразование. Согласно опытным данным, полученным на свинце, по сравнению с обычными цилиндрическими валками, объём наплыва в области локальной пластической деформации в кромочной области уменьшается в 2 раза [13].

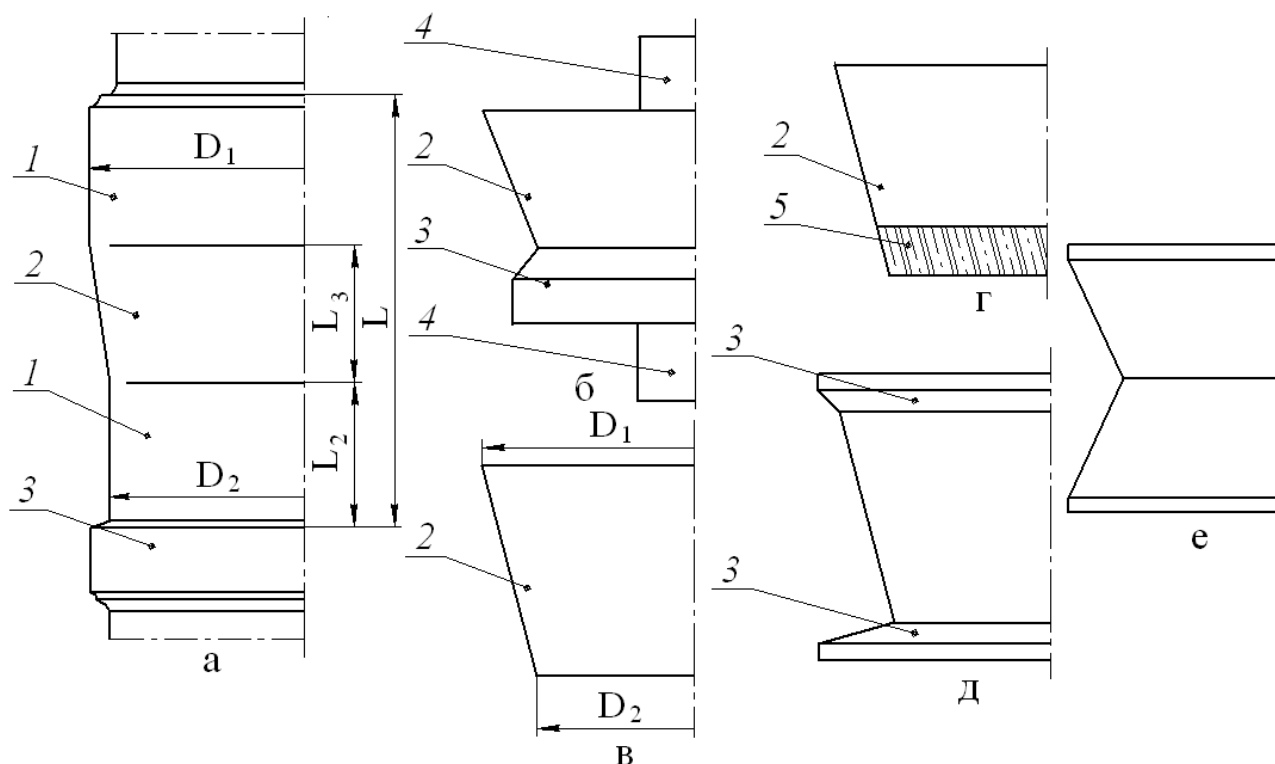


Рис. 4. Конические валки: 1 и 2 – цилиндрический и конический участки, 3 – бурт, 4 – шейка валка, 5 – насечка

В работе [14] представлены конические валки (рис. 4, в–д), уменьшающие обрызг и повышающие производительность процесса. Для повышения захватывающей способности при необходимости на конические валки предлагается наносить насечку (рис. 4, г). Для повышения устойчивости конические валки предложено делать с буртами (рис. 4, д). Отличительной особенностью от предыдущих является то, что валки устанавливают под углом и возможны два варианта редуцирования (рис. 5).

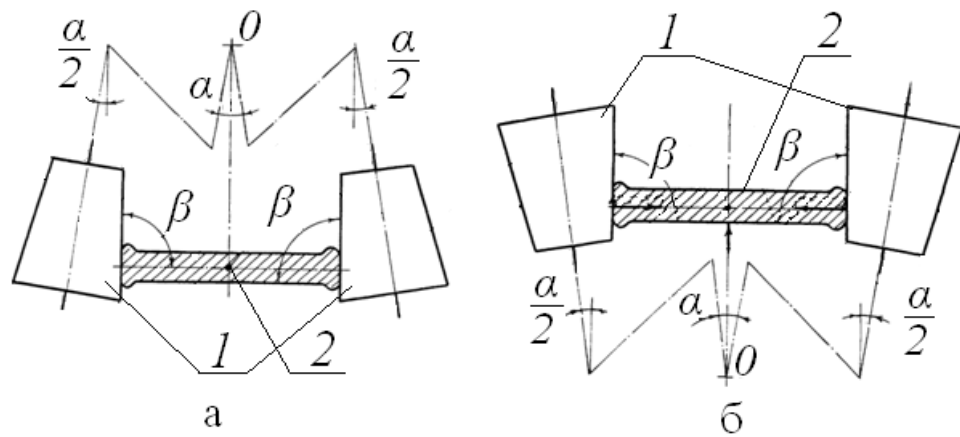


Рис. 5. Способы редуцирования раската коническими валками [14]:

1 – конический валок, 2 – раскат

Согласно первому варианту (рис. 5, а) прокатывают толстые и тонкие раскаты, второй же вариант предназначен преимущественно для тонких раскатов. И в зависимости от того какой режим прокатки преобладает в черновой группе ШСП, можно устанавливать сначала валки в первых проходах по первому варианту, в последних по второму – при повышенных обжатиях в начале прокатки и пониженных в конце и наоборот. Использование данных схем позволяет также снизить усилия прокатки при деформации на бочке вала меньшего диаметра и повысить поперечную устойчивость раската [14].

Последний валок (рис. 4, е) по факту представляет собой два составных конических вала, при этом верхний валок расположен с большим диаметром сверху, а нижний – большим снизу. Данный валок всё же представляет собой монолитный валок с V-образным ручьём, но его можно считать бисистемой конических валков. Искомые валки предлагается использовать для обжатия торцевых кромок раската в черновой стадии прокатки перед горизонтальными проходами с целью сокращения расхода металла, идущего на обрезь, и уменьшения разнотолщинности раската по длине преимущественно для производства толстолистного листа [15].

Для уменьшения дефектов кромок разработаны валки с выступами, которые являются диаметрально противоположными валками с V-образным ручьём. Вертикальное положение валков регулируется гидроцилиндрами (рис. 6). В

первых проходах раскат деформируется между выступами (рис. 6, а), затем валки поднимаются и редуцирование производится цилиндрическими частями валков (рис. 6, б) [16]. Аналогичные валки только для крупносортовых и заготовочных станков предложены отечественными исследователями [17].

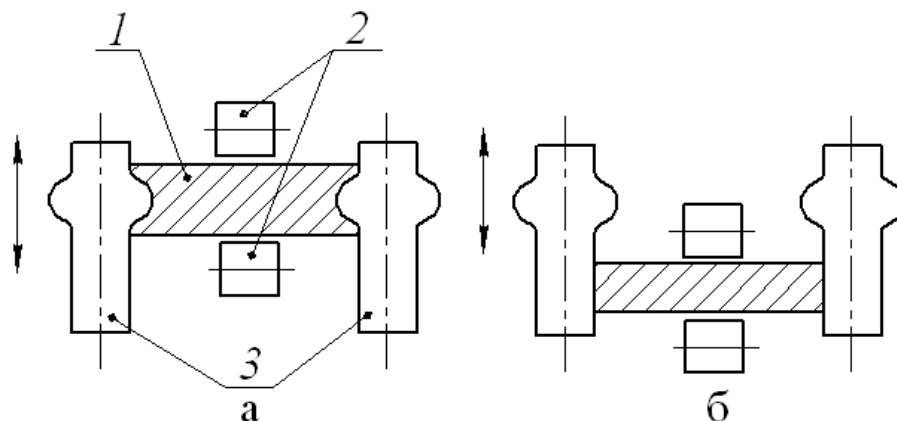


Рис. 6. Режимы обжатия раската валками с выступами:

1 – раскат, 2 – поддерживающие ролики, 3 – валки с выступами

Калиброванные валки

Применение калиброванных вертикальных валков даёт возможность большего обжатия за проход при лучшей поперечной устойчивости раската, предоставляет более гибкие способы борьбы с некоторыми недостатками технологии (например, неравномерность температуры по толщине или ширине сляба) и, как результат, способствует уменьшению концевой обрезки. Существует множество различных конструкций вертикальных калиброванных валков (рис. 7).

Первые три вертикальных валка (рис. 7, а–в) можно назвать валками с «микрокалибрами», поэтому они представлены увеличенными для более детального отображения их основных элементов. Первый валок, валок с винтовыми проточками (рис. 7, а), служит для стабилизации процесса прокатки при расширении сортамента прокатываемых слябов. Винтовые проточки выполнены шириной 0,6-0,7 длины рабочего участка бочки, глубиной 0,015 радиуса валка с углом наклона к горизонтальной плоскости, зависящим от диаметра и

ширины бочки. Такая конструкция валков создаёт прижимающие силы к транспортирующим роликам, которые препятствуют лыжеобразованию на переднем конце раската и облегают задачу раската в горизонтальные валки, а также способствуют удержанию раската в горизонтальной плоскости, что в свою очередь исключает возможность скручивания раската при интенсивном боковом обжа-
тии. Валки с шириной проточек 150-175 мм, глубиной 8 мм, углом наклона 17° , диаметром 1100 мм для деформации сляба толщиной 250 мм применяли на Череповецком металлургическом комбинате [5, 18].

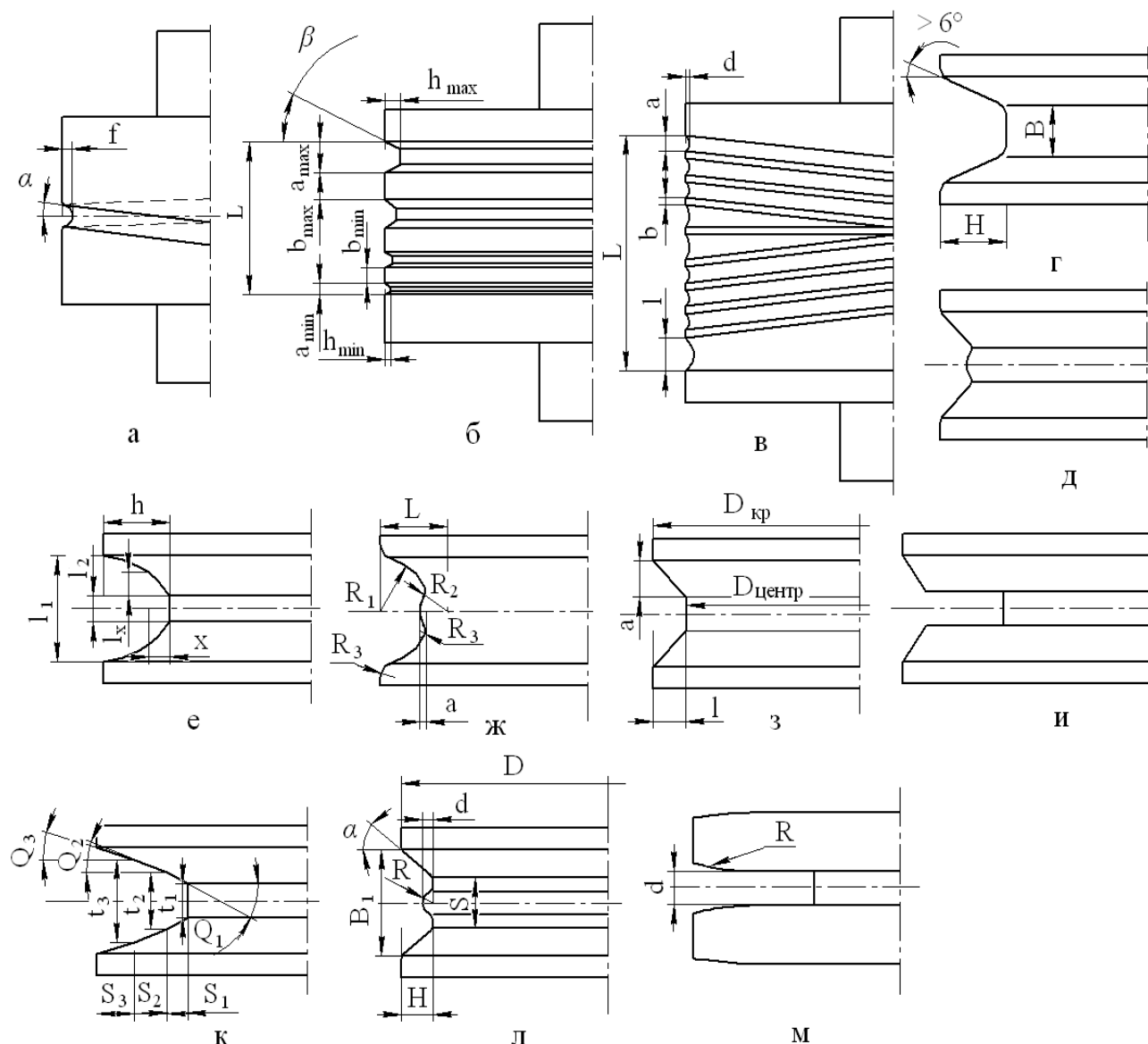


Рис. 7. Калиброванные вертикальные валки

Вертикальный валок с ящичными калибрами (рис. 7, б) служит для повышения производительности на 10% и точности проката по ширине путём ис-

ключения винтообразования раската при прокатке. При этом максимальный ящичный калибр выполнен у верхнего края бочки, а все последующие - с уменьшением глубины и ширины к нижнему краю бочки, уменьшение глубины калибров составляет 0,028-0,006 радиуса бочки валка. Применение такой конструкции валков позволяет продлить кампанию валков за счёт снижения износа неравномерности обжатий боковых граней по высоте [19].

Валки с ручьями, выполненными по винтовым линиям и образующими по разные стороны от середины бочки валка правую и левую спирали (рис. 7, в) с шагом между ручьями 0,025-0,06 радиуса бочки валка и с шириной каждого ручья 0,04-0,06 радиуса валка, служат для исключения винтообразования и сваливания раскатов и способствуют стабилизации процесса прокатки [20].

Калибр вертикального валка (рис. 7, г) выполнен с соотношением характерных размеров ручья: глубины (Н) к минимальной ширине (В), которое должно быть от 0,9 и более, а бурт выполнен с углом более 6°. Такая конструкция обеспечивает защемление полос, что снижает продольный изгиб [21].

Среди всех используемых калибров широкое применение как на отечественных ШСГП и толстолистовых станах (ТЛС), так и зарубежных нашли вертикальные калиброванные валки с выпуклым дном (рис 7, д). Выпуклость выравнивает распределение высотной деформации по толщине сляба и при определённых значениях величины выпуклости в ходе дальнейшего горизонтального обжатия можно получить плоскую боковую поверхность раската. В Японии фирма «Кавасаки сйэтэцу» использует валки с выпуклостью 30 мм для слябов 220, 190 и 165 мм, на ТЛС 2800 ОАО «НОСТА» (ОХМК) – 25 мм для слябов 160, 180, 200, 220 и 270 мм, на ШСГП 2000 ОАО ММК – 5 мм для слябов 250 мм [10, 22]. В то же время в работе [23] существует рекомендация принимать значение выпуклости дна калибра 0,05-0,06 толщины сляба. Выпуклость дна способствует также удержанию таких дефектов, как поперечные и продольные трещины в прикромочной зоне, что благоприятно сказывается на качестве раската [22-24].

Вертикальный валок с кольцевым ручьём ящичного типа (рис. 7, е), минимальная ширина дна калибра (l_2) которого составляет 0,05-0,25 его максимально ширины (l_1), а профиль боковых выпусков описан политропной кривой, приводит к снижению дефекта «рыбий хвост». Это достигается за счёт неравномерности обжатий по толщине, которая при горизонтальных проходах приводит к выравниванию вытяжек центральных слоёв металла и на боковых кромках раската, при этом боковые кромки формируются так, что сохраняют свою конфигурацию до конечной толщины раската [25].

Следующий калибр вогнутый с выпуклым дном (рис 7, ж). Бочка валка имеет калибр дугообразной формы радиуса R_1 , с выпуклым участком радиуса R_2 , с плавно сопряжёнными участками радиуса R_3 . При соотношении R_2/R_1 в пределах 0,4-1,5 достигается улучшение формы концов и качества кромок, исключая их растрескивание, повышается выравнивающая способность и эффективность обжатия в вертикальных валках как при прямой, так и при реверсивной прокатке, тем самым увеличивается выход годного [26].

Особенностью вертикального валка, центральная часть которого выполнена из цилиндрического участка ($D_{\text{центр}}$), плавно сопряжённого с кромочной зоной большего диаметра ($D_{\text{кр}}$) (рис. 7, з), заключается в учёте его геометрического критерия профилирования при последующей прокатке в горизонтальных валках и создании определённой профилировки горизонтального валка. При такой профилировке вертикального и горизонтального валков достигается улучшение качества горячекатаных полос путём повышения точности их размеров в плане [27].

Существуют также вертикальные калибры с параллельными стенками (рис. 7, и), которые значительно повышают поперечную устойчивость раската и смещают наплывы на расстояние 100-400 мм от кромки сляба, т.е. на глубину вреза ручья [5]. В связи с тем, что требуются валки большого диаметра, значительно увеличивающие усилия деформации, хотя ширина ручья равна толщине сляба, были предложены конические валки (рис 7, м) [28], служащие только для

смещения наплывов после деформации сляба в вертикальной клетки и до горизонтального прохода.

Японские исследователи также предложили валок (рис. 7, к) для обжатия слитка или сляба. Глубина нижней стенки ручья разбита на три конических участка (S_1 , S_2 , S_3), которые между собой сопряжены плавным переходом. Ширина дна калибра t_1 равна толщине конечного сляба при прокатке слитка или раската при прокатке сляба, а ширина t_3 равна исходной толщине слитка или сляба. Специально подобранные углы конусных участков находятся в пределах, исключающих переполнение калибра и ограничивающих утолщение боковых кромок слитка или сляба. Данный валок применим при реверсивной прокатке и позволяет прокатывать слитки или слябы различной толщины [29].

Для уменьшения дефекта «рыбий хвост» и повышения эффективности вертикального обжатия разработан калибр (рис 7, л) с шириной вреза (S), равной 0,90-1,05 толщины сляба, и глубиной вреза 0,05-0,15 диаметра вала, имеющего цилиндрическую бочку с выступом (d) 0,02-0,10 толщины сляба и радиусом, равным 0,2-0,4 толщины сляба. Бурты расположены под углом 45-75° ко дну калибра. Такая конструкция вала обеспечивает лучшее удаление окалины, смещает наплывы к середине сляба и предотвращает перетекание дефектов на лицевую сторону сляба [30].

Среди вертикальных калибров можно выделить ассиметричные калибры (рис. 8). Несимметричность наблюдается как относительно горизонтали (рис. 8, а–е), (сюда же можно отнести рассмотренные ранее вертикальные валки с микрокалибрами (рис. 7, а, б)) в одном вертикальном калиброванном валке, но пара валков симметрична относительно вертикали, так и относительно вертикали (рис. 8, ж–и), когда два вала, находящиеся в одной горизонтальной плоскости и обжимающие сляб в одно и то же время имеют, различия между собой и при этом симметрии между ними нет.

Вертикальный валок с буртами различного диаметра, при этом ручей может быть врезан наклонно или прямо по отношению к уровню прокатки, а бур-

ты изготовлены с различными выпусками ($H_1 \neq H_2$) (рис. 8, а), при работе в паре с таким же валком они обеспечивают заданное направление продольного изгиба полосы [21]. Данный эффект можно получить коническими валками, расположенными строго вертикально меньшими диаметрами вниз или симметричными вертикальными валками с калибрами или без них под наклоном друг к другу в плоскости, перпендикулярной направлению прокатки, между валками располагают опорный ролик, в который упирается раскат. Принудительный продольный изгиб позволяет на 3-5% увеличить обжатие по ширине и повысить устойчивость раската [5, 10].

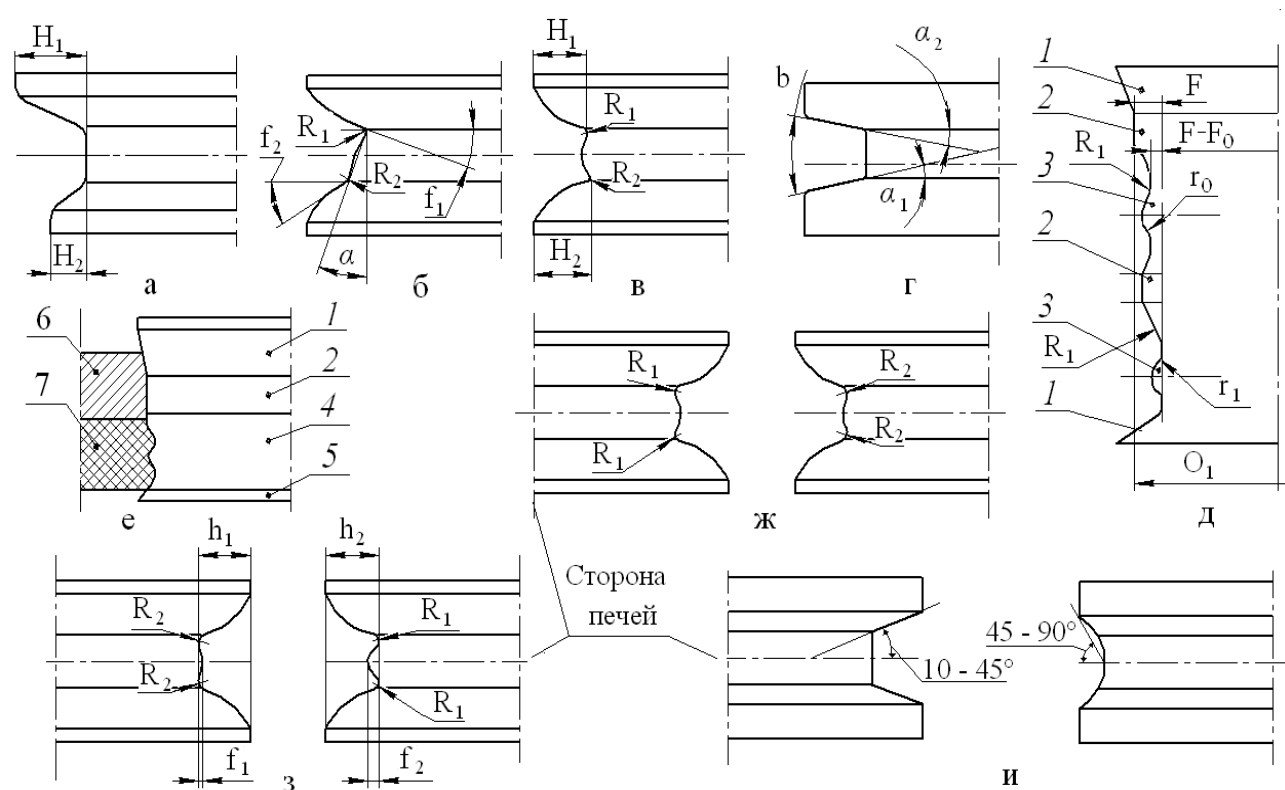


Рис. 8. Ассиметричные калибры:

1 – конический участок, 2 – цилиндрический участок, 3 – симметричный ручей с вогнутыми стенками, 4 – участок эллиптической формы с выпуклостью в средней части, 5 – бурт, 6 – сляб, 7 – раскат

Для повышения качества горячекатаных полос путём равномерной проработки боковых граней раската с учётом неравномерности температуры по толщине предложены калибровки валков, представленные на рис. 8, б – г. Кон-

структивные особенности этих валков позволяют деформировать более горячие кромки нижней поверхности слэбов без образования на кромочных участках значительных выпуклостей металла и способствуют перераспределению кромочной деформации в более глубокие центральные слои слэба. Данное мероприятие достигается за счёт наклона дна валка под углом (α) выполненного по образующей, в сторону менее нагретой грани и разных радиусов сопряжений буртов и дна калибра ($R_1 \neq R_2$) (рис. 8, б) [5, 31], вогнутостью участков дна по месту сопряжения с выпусками радиуса разной кривизны ($R_1 \neq R_2$) и глубиной этих участков ручья друг относительно друга ($H_1 \neq H_2$) (рис. 8, в) [32], разными углами наклона верхнего и нижнего конических выпусков ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) по отношению к радиальной плоскости сечения валка (рис. 8, г) [33]. Применение всех трёх рассмотренных калибровок позволяет повысить качество раската и снизить количество кромочной обрезки.

Для уменьшения дефектов на кромках и стабилизации процесса прокатки в вертикальной клетке за счёт устойчивости при высоких обжатиях предложены две профилировки вертикальных валков (рис. 8, д, е). Достигаются данные положительные эффекты за счёт конических участков, эллиптических участков с выпуклостью посередине (рис. 8, е) или симметричным ручьём с выпуклостью (рис. 8, д), которые формируют двойную бочкообразность боковых граней раската. Вертикальный валок первой конструкции (рис. 8, д) за счёт двойных ручьёв пригоден для толстолистовой прокатки, где и был опробован для слэбов 365-410×1540×6000 мм и его применение способствовало увеличению производительности и повышению выхода годного [34]. Валок второй конструкции (рис. 8, е), являясь более ранней разработкой, предпочтителен для черновых проходов в ШСГП, хотя может быть использован и для производства толстого листа [35].

С целью уменьшения концевой обрезки и равномерности проработки разнагретых граней раската по ширине, вызванных особенностями выдачи слэбов из печей, предложены три ассиметричные профилировки вертикальных

валков (рис. 8, ж–и). В этих валках обеспечивается выравнивание суммы температурно-деформационных условий за счёт разнородной проработки граней раската, которая приводит к равенству вытяжек металла по граням и получению симметричной концевой обрезки. Это достигается посредством разного профиля кольцевых ручьёв, очерченных политропными или параболическими кривыми с различными показателями степеней у каждого валка, и разными радиусами сопряжения бурта и дна ручья ($R_1 \neq R_2$) (рис. 8, ж) [36], разных величин выпуклостей дна ручьёв ($f_1 \neq f_2$) и глубин вреза ($h_1 \neq h_2$) (рис. 8, з) [37], подстуживанием боковой грани сляба на величину, прямо пропорциональную разности вытяжек по ширине, проработкой их на бочке вертикального валка со стенками ручьёв, образующими угол с поперечной осью симметрии сляба 10-45° с одной стороны и 45-90° с другой (рис. 8, и) [38].

Комбинированные вертикальные валки

Существуют вертикальные валки, представляющие собой комбинацию нескольких валков и выполняющие сразу несколько функций. Два таких валка представлены на рис. 9. Так, если объединить гофрированный валок [8] и вертикальный калиброванный валок [21], то получится прокатный валок с постоянной захватывающей способностью, независимой от износа в ходе его использования и со значительно продлённым ресурсом эксплуатации [39]. Вместо гофров предлагается использовать валики из износостойкого материала, внедрённые в бочку на глубину 0,4-0,7 их высоты (рис. 9, а).

Эффективное использование вертикального валка при реверсивных проходах возможно только при проглаживающих проходах, но при обжати по горизонтали дальнейшая прокатка ведётся уже как на гладкой бочке. Для повышения эффективности редуцирования разрабатывают валки с наклонными коническими буртами [29] либо отказываются от калиброванных валков в пользу валков с гладкой бочкой или валков с микрокалибрами [18, 19]. Но при использовании вертикального валка с подвижным буртом, который регулируется от

привода валка в паузах, эффективность редуцирования значительно повышается как и выход годного (рис. 9, б) [40]. Аналогичные валки с подвижными втулками запатентованы в Японии [5].

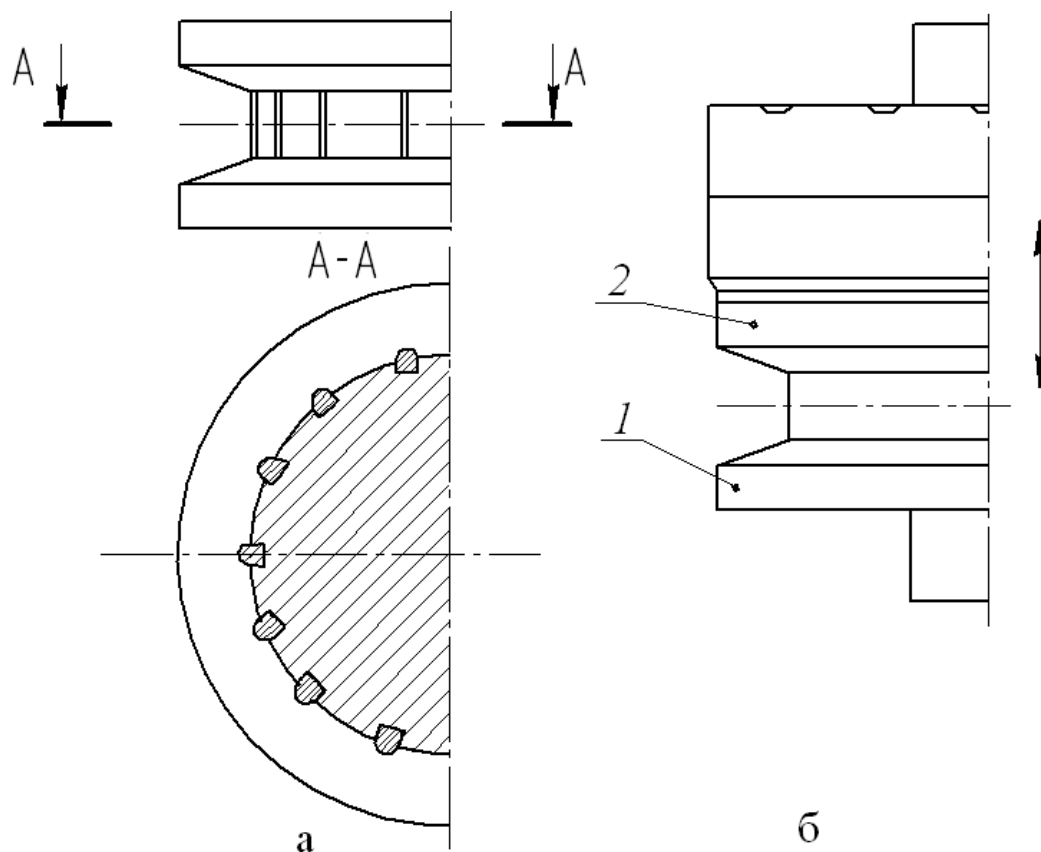


Рис. 9. Комбинированные валки:

1 – подвижный бурт, 2 – неподвижный бурт

Заключение

Несмотря на развитие новых способов редуцирования слябов, обжатие сляба по ширине в вертикальных валках остаётся высокопроизводительным способом, поддерживающим поточность технологической линии. Практикой установлены рациональные размеры основных элементов вертикальных калиброванных валков: радиус – 400-600 мм, глубина вреза ручья – 75-150 мм, отношение ширины калибра к толщине сляба – 0,90-1,05, угол наклона стенки ручья 10-30°, выпуклость дна бочки валка 5-30 мм. И хотя встречаются некоторые от-

дельные значения данных величин элементов, которые не входят в этот интервал, для традиционных ШСП и ТЛС коренных изменений этих параметров в ближайшее время скорее всего не предвидится. Использование комбинированных вертикальных валков пока не получило должного распространения в связи со сложностью некоторых механизмов и отсутствием потребности в некоторых функциях, хотя данная область является перспективной как для развития дальнейшей гибкости редуцирования слябов по ширине, так и для устранения недостатков технологии.

Библиографический список

1. Медовар Б.И., Шукстульский Б.И. К вопросу оптимизации совместной работы непрерывного литья заготовки и прокатного стана // Проблемы специальной электрометаллургии. 1994. № 3-4. С. 79-80.
2. Соловьев А.Г., Шитов М.В. Пример повышения энергоэффективности технологической системы МНЛЗ – ШСП // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегиональный сб. науч. трудов. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. С. 178-185.
3. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
4. Сафонова М.К. Зарубежные широкополосные станы горячей прокатки // Черная металлургия. Сер. Прокатное производство. / Ин-т «Черметинформация», 1986. Вып. 6. 34 с.
5. Тимошенко Л.В., Логак О.Н., Мазур В.Л. Современный способы уменьшения концевой обрезки раскатов на широкополосных станах горячей прокатки. // Бюллетень Черметинформация. 1989. №3. С. 33-45.
6. Бобров В.В., Полещук В.М., Гладуш В.Д. Оптимизация нестационарных процессов прокатки. Киев: Техника, 1984. 127 с.

7. Алдунин А.В., Кохан Л.С. Проникновение пластической деформации по толщине прокатываемой полосы // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия, 2007. №11. С. 34-37.
8. А.с. 75933 СССР, МПК В 21 В 27/02. Прокатный валок / А.П.Чекмарёв. // Бюл. 1949. №24. 4 с.
9. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1998. 283 с.
10. Салганик В.М., Кульпин Е.В. Формирование ширины полос при горячей прокатке // Обзорн. информ.: М.: Ин-т «Черметинформация». Сер. Прокатное производство. 1989. Вып. 2. 24 с.
11. Заявка 60-71751 Японии, МКИ В21В 1/22, В21В 1/02, В21В 13/06, В21В 31/16. Эджерный способ прокатки / Tokio Mizuta. Оpubл. 13.10.1986.
12. А.с. 712152 СССР, МПК В 21 В 27/02. Прокатный валок преимущественно для вертикальной клетки слябинга / Г.И. Капланов. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1980. №4. С. 23.
13. Патент на полезную модель 42192 РФ, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок / Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев, К.А. Лисичкина и др. // БИПМ. 2004. №33. С. 691-692.
14. Патент 2182050 РФ, МПК В 21 В 1/26. Способ горячей прокатки / В.Н. Хлопонин, П.П. Чернов // БИПМ. 2002. № 13. С. 237-238.
15. А.с. 505448 СССР, МПК В 21 В 1/38. Способ получения листов прокаткой / А.В. Зайцев, В.В. Миллер, Н.А. Бондаренко и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1976. №9. С. 15.
16. Заявка 05275435 Японии, МПК В 21 В 1/26. Способ горячей прокатки с предотвращением дефекта кромок стального листа / Kiyota Osamu, Ohachi Hiroshi. Оpubл. 03.03.1999.
17. Патент 1773237 РФ, МПК В 21 В 27/02. Валок прокатного стана [Текст] / И.К. Дорожко, М.Б. Луцкий, М.Г. Дьяченко и др. // БИПМ. 1992. №40. С. 199.

18. А.с. 1091954 СССР, МПК В 21 В 27/02. Комплект вертикальных валков / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.В. Оробцев и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1984. №18. С. 19.

19. А.с. 1163925 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальных валок универсальной клетки / Ю.В. Коновалов, Е.А. Руденко, В.В. Оробцев и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1985. №24. С. 25.

20. А.с. 1639812 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок реверсивной универсальной клетки / Е.А. Руденко, В.К. Шевцов, С.Л. Неустроев и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1991. №13. С. 56.

21. А.с. 304004 СССР, МПК В 21 В 27/02. Калибр прокатных валков для редуцирования слябов по ширине / Ю.М. Чижилов, В.П. Морозов, В.Г. Ламинцев. // Там же. 1971. №17. С. 18.

22. Шабалов И.П. Промышленное исследование перехода металла с боковых граней сляба на основные поверхности листа // Производство проката. 2004. №9. С. 3-12.

23. Литовченко Н.В. Станы и технология прокатки листовой стали. М.: Металлургия, 1979. 272 с.

24. Разработка эффективной схемы черновой прокатки низколегированных сталей. В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. // Сталь. 2008. №9. С. 50-52.

25. А.с. 1458039 СССР, МПК, В 21 В 27/02. Вертикальный валок широкополосного стана горячей прокатки / Л.В. Тимошенко, В.И. Хохлов, В.Л. Мазур и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1989. №6. С. 47-48.

26. А.с. 1708458 СССР, МПК, В 21 В 27/02. Прокатный валок вертикальной клетки / В.В. Оробцев, Е.А. Руденко, И.А. Бобух и др. // Бюллетень изобретений. 1992. №4. С. 44.

27. А.с. 1777567 СССР, МПК В 21 В 27/02. Комплект валков / Д.Л. Романовский, Л.Ш. Новак, С.Г. Краснов и др. // Там же. 1992. №43. С. 183.

28. Заявка 60-118305 Японии, МКИ В 21 В 1/22. Метод горячей деформация сляба / Takebayfshi Katsuhiko, Kusaba Takashi, Kataoka Kenji. Оpubл. 25.06.1985.

29. Заявка 06069967 Японии, МКИ В 21 В 27/02, В 21 В 1/02. Вертикальный валок с ручьями для обжата плоской заготовки с боковой стороны / Sakai Hiroyushi, Azuma Shozo, Miyake Masaru и др. // Изобретения стран мира. 2000. №18. С. 11.

30. Патент 2277021 РФ, МПК В 21 В 1/22. Способ листовой прокатки и устройство для его реализации / Н.Б. Скороходов, В.В. Глухов, В.С. Смирнов и др. // БИПМ. 2006. №15. С. 445-446.

31. А.с. 1574300 СССР, МПК В 21 В 27/02. Способ горячей прокатки полосового металла / Л.В. Тимошенко, В.И. Хохлов, А.Д. Белянский и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1990. №24. С. 26.

32. А.с. 1523203 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок широкополосного стана горячей прокатки / Л.В. Тимошенко, В.И. Хохлов, Г.В. Рассомахи́н и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1989. № 43. С. 37.

33. А.с. 1482743 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок прокатной клетки широкополосного стана / Л.В. Тимошенко, О.Н. Логак, А.Г. Болодин и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1989. №20. С. 42-43.

34. А.с. 1603595 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок / А.Л. Слючаренко, В.В. Лашин, А.И. Баканов и др. // Бюллетень изобретений. 1994. №21. С. 143.

35. А.с. 755350 СССР, МПК В 21 В 27/02. Вертикальный валок для деформации боковых кромок сляба / А.В. Бирюлев, В.К. Воронцов, А.Л. Слюсаренко и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1980. №30. С. 30.

36. А.с. 1599139 СССР, МПК В 21 В 27/02. Комплект вертикальных валков эджерных клетей широкополосного стана горячей прокатки / Л.В. Тимошенко, В.И. Хохлов, А.Д. Бемянский и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1990. №38. С. 50.

37. А.с. 1574298 СССР, МПК В 21 В 27/02. Способ горячей прокатки полосового металла / Л.В. Тимошенко, В.И. Хохлов, А.Д. Бемянский и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1990. №24. С. 25-26.

38. А.с. 1260049 СССР, МПК В 21 В 1/38. Способ горячей прокатки полосового металла / В.Н. Хлопонин, П.И. Полухин, А.Д. Бемянский и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1986. №36. С. 20.

39. А.с. 1362516 СССР, МПК В 21 В 27/02. Прокатный валок / В.И. Дервянко, Г.Ф. Кулагин, В.Н. Володарец и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1987. №48. 24 с.

40. А.с. № 1065048 СССР, МПК В 21 В 27/02. Узел калиброванного валка / М.С. Карпышев, В.В. Хорьков, В.И. Зюзин и др. // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1984. №1. С. 35.

Н.Г. Шемшурова, В.Г. Антипанов, Е.П. Киселева

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ

В статье рассмотрены способы упрочнения прокатных валков. Представлена характеристика некоторых технологических методов обработки поверхностного слоя прокатных валков. Описаны технология и результаты борирования элементов валков профилегибочных станов. Представлены результаты исследования перспективного метода упрочнения – с помощью детонационно-газового напыления.

Ключевые слова: прокатные валки, способы упрочнения, борирование, напыление, детонационно-газовое покрытие.

Валки являются основным инструментом прокатных станов. Качество проката, его эксплуатационные свойства во многом зависят от износоустойчивости, шероховатости и других характеристик валкового инструмента. Поэтому большое внимание уделяют вопросам повышения их износостойкости.

Существуют различные технологии обеспечения заданных параметров поверхностного слоя валков и повышения их износостойкости [1,2].

Технологические показатели и физико-механические параметры поверхности после обработки валков приведены в таблице 1.

На профилегибочном стане 1-4×50-300 завода «Запорожсталь» (Украина) используют способ *электроискрового восстановления валков* [3]. Этот способ основан на периодическом возбуждении искрового разряда между обрабатываемой деталью (катодом) и обрабатывающим электродом (анодом), материал которого переносится в плазменном состоянии на катод, насыщаясь компонен-

тами среды. В результате на обрабатываемой поверхности образуется слой, обладающий высокой износостойкостью.

Таблица 1

Характеристика некоторых технологических методов обработки
поверхностного слоя прокатных валков [1]

Метод обработки	Шероховатость поверхности R_a , мкм	Толщина модифицированного слоя, мм	Степень упрочнения, %	Максим. напряжение σ , МПа	Точность обработки / твердость
Поверхностное пластическое деформирование					
Дробеметная обработка (дробеструйная)	1,6-0,04	0,2-1,5	20-40	200-750	Сохраняется
Ультразвуковая ППД	1,25-0,32	0,05-1,5	10-40	200-500	Сохраняется
Накатывание	1,25-0,04	0,1-0,5	20-50	500-700	Сохраняется
Выглаживание алмазное	1,25-0,04	0,01-0,3	10-60	500-700	Сохраняется
Поверхностная термическая обработка					
Закалка с нагревом ТВЧ	Не изменяется	0,2-10,0	-	900-800	Не сохраняется / HRC 40-70
Закалка с нагревом ТПЧ	Не изменяется	0,5-20,0	-	900-800	Не сохраняется / HRC 40-70
Химико-термическая обработка					
Цементация	Не изменяется	1-10	-	400-800	Не сохраняется / HRC 60-70
Борирование	Не изменяется	0,35-10	-	-	Не сохраняется / 225-385 HV
Хромирование	Ухудшается	0,2-0,02	-	-	Не сохраняется / 100-200 HV
Лазерная обработка					
Термообработка (легирование)	Ухудшается	1×10^{-2} (1×10^{-1})	-	-	Не сохраняется

Установлено, что электроискровое восстановление валков профилегибочного стана обеспечивает повышение их износостойкости в 1,8-2,0 раза.

Одним из действенных способов повышения срока службы валков является *диффузионное борирование*. Насыщение поверхности валков бором повышает их твердость и износоустойчивость в условиях абразивного изнашивания, жаростойкость и стойкость против коррозии. Существуют несколько приемов борирования [4]: в порошкообразных смесях (твердофазное); в жидкой среде; газовое; электролитическое.

При выборе метода борирования руководствуются его технологичностью, удобством осуществления процесса в промышленных условиях, экономической рентабельностью.

Борирование в порошкообразных смесях позволяет проводить насыщение поверхности изделий сложной конфигурации. При правильном выборе боросодержащей шихты получают качественные плотные покрытия необходимой глубины за сравнительно короткое время, хотя скорость насыщения при этом несколько ниже, чем в жидкой ванне. Использование в качестве боросодержащей смеси карбида бора с бурой (84 % B_4C и 16 % $Na_2B_4O_7$) позволяет получать равномерное и достаточно плотное покрытие. Метод не требует сложного оборудования (нагревательная печь и цементационный ящик) и специальных защитных мероприятий, легко осуществляется в производственных условиях.

Наибольший практический интерес представляет для борирования карбид бора (B_4C) или смесь карбида бора с бурой (84 % B_4C и 16 % $Na_2B_4O_7$). Последняя смесь предпочтительнее. При этом чем больше суммарная поверхность частиц, то есть чем они мельче, тем интенсивнее идет реакция и выше скорость насыщения [5].

В МГТУ им. Г.И.Носова выполнили твердофазное борирование бандажа валков профилегибочного стана (ПГС) 1-4х50-300 в порошке карбида бора. Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. С.А. Тулупова и д.т.н., проф. А.Н. Завалищина.

Предварительно опыты проводили на плоских образцах из стали марки 9Х, которые укладывали в цилиндрический контейнер и заполняли его боросодержащим порошком с добавлением фторопласта в качестве активатора. Перед загрузкой в печь контейнер закрывали асбестовой прокладкой, на которую засыпали песок и наносили размельченную силикат-глыбу, выполняющую роль герметического плавного затвора. Температуру нагрева варьировали от 900 до 1000⁰С. Контроль температуры осуществляли с помощью платиновой термопары. Борирование в карбиде бора происходило в результате взаимодействия B_4C с B_2O_3 , содержащимся в техническом карбиде бора в количестве 2-3 весовых процента. При этом имело место восстановление B_2O_3 карбидом бора до B_2O_2 с выделением активного бора $B_2O_2 \rightarrow B_2O_3 + (B)_{Fe}$, что обуславливает процесс насыщения стали бором.

Контейнер с образцами охлаждали на воздухе. После чего плавный затвор разрушали и бандаж извлекали из контейнера. Такая технология отличается простотой, достаточно высокой скоростью борирования, хорошей воспроизводимостью и может быть легко внедрена в промышленное производство, имеющее стандартное термическое оборудование. Следует отметить, что карбид бора не спекается, поэтому облегчается извлечение обрабатываемых деталей и возможно повторное использование шихты. Многократное ее использование (до 20 раз) ведет к незначительному снижению активности. В связи с этим данный процесс экономически выгоден.

После охлаждения образцов изготовили шлифы, протравили их в азотной кислоте и определили глубину борированного слоя (табл. 2) Исследование показало:

- с повышением температуры скорость нарастания толщины борированного слоя растет;
- с увеличением времени выдержки наблюдается рост глубины слоя.

Таблица 2

Влияние условий борирования стали марки 9Х на глубину слоя

Время выдержки, час.	Глубина борированного слоя, мкм, при температурах, °С		
	900	950	1000
2	22,4	39,2	95,0
4	44,8	55,8	156,0
6	45,9	63,0	164,0
8	134,4	140,0	-

Временное сопротивление разрыву полученных образцов составило 21,0 кН/мм². Структура боридных слоев имеет характерное игольчатое строение; на образце, борированном при температуре 1000⁰С, иглы достигают больших размеров – до 112 мкм. Также имеется в наличии «переходная зона» с отличной от сердцевины структурой, обогащенная углеродом и бором. Ее образование объясняется вытеснением углерода из зоны боридов и увеличением за счет этого его концентрации под боридным слоем. Наблюдения показали, что характер строения переходной зоны оказывает существенное влияние на работоспособность боридного слоя, на прочность связи его с основным металлом, на распределение внутренних напряжений и развитие усталостных явлений. Наилучший слой получается при борировании в течение 8 часов при температуре 950⁰С: достаточно глубокий, не очень хрупкий, с высокой плотностью и твердостью ($\sigma_B = 21,7$ кН/мм²).

Для борирования выбраны цилиндрические элементы нижнего вала для формовки швеллерного профиля 80x50x4,0 мм, которые имели радиальный износ при профилировании 0,2-0,4 мм. Был изготовлен контейнер, цилиндрический корпус которого выполнен из жаропрочной стали. На данное устройство получен патент [6].

Борирование проводили в электропечи сопротивления СНО 3Х52/10И2. Температуру контролировали с помощью платиновой термопары, выводы ко-

торой соединены с потенциометром КСПЗП. Режим борирования: температура 980⁰С, время выдержки 7 час.

Проведено опытное профилирование швеллерного профиля 80x50x4,0 мм из стали марки СтЗпс на ПГС 2-8x100-600 ОАО «ММК». Сравнение результатов замера износа элементов валков, закаленных по обычной технологии и борированных после профилирования 750 т швеллера, показало, что стойкость борированных элементов валков была выше в 4,5 раза. При последующей обработке валков борированный слой толщиной до 0,15-0,17 мм не влияет на режим работы режущего инструмента (незначительно увеличивается время) при переточке бандажа (для ПГС 1-4x50-300).

В последнее время появилось много публикаций по различным способам напыления износостойких покрытий на валки прокатных станов.

Газопламенное напыление. Порошковый материал подается в пламя ацетилен-кислородной горелки, расплавляется и переносится сжатым воздухом на поверхность изделия, где, остывая, формирует покрытие. Метод прост в освоении и применении, может применяться как в ручном, так и в автоматизированном режиме. С помощью газопламенного напыления наносят износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия из железных, никелевых, медных, алюминиевых, цинковых сплавов, баббитовые покрытия подшипников скольжения, электропроводные покрытия, электроизоляционные покрытия (рилсан), декоративные покрытия.

Плазменное напыление – процесс нанесения покрытия на поверхность изделия с помощью плазменной струи. В высокотемпературную плазменную струю подаётся распыляемый материал, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку. При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия. Плазменная обработка позволила упрочнять поверхность конструкционных материалов. Плазменное напыление позволяет создавать новые композиционные материалы и покрытия, которые не могут быть получены другими методами.

Напыление с оплавлением – метод, позволяющий получать плотные износостойкие коррозионностойкие покрытия с высокой адгезией. Напыление покрытий выполняют установками газопорошкового напыления из самофлюсующихся металлических порошков.

Одним из современных методов повышения износостойкости прокатных валков является *детонационно-газовое напыление* – процесс нанесения покрытий на поверхность детали путем напыления порошкообразного материала продуктами сгорания, возникающими в результате направленного взрыва газовой смеси, при котором химическая энергия газов периодически освобождается в форме детонационных волн [7].

Метод позволяет получать наивысшее качество покрытий по сравнению с альтернативными способами напыления (газопламенное, плазменное) – практически беспористые покрытия с высоким уровнем адгезии с материалом основы, позволяет улучшать и даже полностью изменять поверхностные свойства деталей, получать заранее прогнозируемые свойства поверхности.

Для повышения износостойкости рабочих валков дрессировочной клетки агрегата непрерывного горячего цинкования (АНГЦ) мы предлагаем наносить износостойкое покрытие детонационным методом, так как известно, что детонационно-газовое напыление наиболее эффективно увеличивает ресурс работы деталей машин и механизмов, работающих в условиях повышенных нагрузок, интенсивного изнашивания, воздействия высоких температур и агрессивных сред. Наносимый слой имеет твердость 1390 HV_{0,3}, что позволяет увеличить срок службы прокатных валков в 1,5-2,0 раза и тем самым значительно снизить себестоимость производимой продукции.

В Центральной лаборатории контроля ОАО «ММК» в настоящее время проводятся исследования детонационного напыления на ролики листопрямильных машин. Мы предлагаем аналогичное покрытие наносить на валки дрессировочной клетки АНГЦ.

Для исследования процессов детонационного напыления выбрали основные факторы, влияющие на качество покрытия: расстояние от среза ствола

пушки до поверхности детали и скорость движения напыляемых частиц. Первоначально напыление проводили на стекло, качество покрытия определяли визуально с помощью микроскопа, на профилографе и измеряли микротвердость покрытия. Напыление на стекло позволяет увидеть границу раздела, глубину проникновения напыляемых частиц. А с помощью микротвердомера определили твердость покрытия в выбранной точке.

Напыление производили амперитом 517. Использовали пропан-бутановую смесь (от 15 до 28%) с кислородом, количество которого варьировали в пределах 22-28%. Порошок транспортировался аргоном (от 10 до 50%), частота выстрелов равна 2,6 в секунду. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости

Микротвердость, МПа					
Белая зона			Черная зона		
количество выстрелов					
1	5	10	1	5	10
12839	12839	13916	8762	16520	10510
7120	8574	-	8047	13916	11029
8955	8393	-	4746	-	-
5706	-	-	10264	7882	12508
9362	7882	-	5916	7882	-

Вид напыленной поверхности приведен на рис. 1.

В результате исследования установили, что на качество напыления влияют такие факторы, как режим работы пушки; скорость напыляемых частиц; стехиометрический состав газовой смеси, из-за которого качество покрытия снижается; распределение порошка в стволе пушки.



Рис. 1. Напыленная поверхность

К недостаткам метода можно отнести низкую производительность метода – за один «выстрел» получается покрытие толщиной 6 мкм (производительность установки 2-4 выстрела в секунду, рабочая толщина покрытия 0,25-0,30 мм). Из-за большого шума (до 140 дБ) оборудование для детонационного напыления приходится устанавливать в камере со звукоизолирующими стенами.

В результате проведенных испытаний не достигнуто необходимое упрочнение покрываемой поверхности при использовании карбидовольфрамового порошка.

Известен способ обработки роликов листопрямильной машины, который включает предварительную подготовку поверхности ролика путем обдува его под давлением чугуной дробью фракции 180-200 мкм и нанесение двухслойного упрочняющего покрытия методом газодетонационного напыления. При этом внутренний слой покрытия наносят из порошка карбида вольфрама фракции 55-65 мкм с получением толщины внутреннего слоя 15-25 мкм, а внешний слой наносят из порошка меди с примесями не более 0,6% с получением толщины внешнего слоя 8-10 мкм. Использование абразивного обдува (кварцевым песком) подготавливаемой поверхности, а также применение при этой операции чугуной дроби фракцией менее 180 и более 200 мкм вызывало многочис-

ленные случаи отслаивания покрытия при его испытаниях на прочность сцепления с основой [8].

Поэтому данные исследования следует продолжить, варьируя коэффициенты трения и различные наносимые порошки.

Библиографический список

1. Производство и эксплуатация валков на металлургическом предприятии. Т.3. Обработка, восстановление и упрочнение валков / В.Ф.Рашников, А.А.Гостев, Н.Н.Огарков и др. Магнитогорск: МГТУ, 1999. С. 11-52.
2. Производство и эксплуатация валков на металлургическом предприятии. Т.4. Валковый инструмент для производства гнутых профилей / М.Ф.Сафронов, В.Г.Антипанов, Г.С.Гун, Н.Г.Шемшурова и др. Магнитогорск: МГТУ, 1999. С. 10-14.
3. Щекин В.М. Электроискровое восстановление валков профилегибочных станов // Гнутые профили проката: Отрасл. сб. науч. тр. Харьков: УКРНИИМет, 1980. Вып.8. С. 94-98.
4. Глухов В.П. Боридные покрытия в железе и сталях. Киев: Наукова думка, 1970.
5. Повышение стойкости валков и ужесточение режимов профилирования на профилегибочных станах ЛПЦ-7 ММК: Отчет по научно-исследовательской работе / Науч. руководит. С.А.Тулупов, отв. исполнит. Н.Г.Шемшурова. № гос. регистрации 80038210. Магнитогорск: МГМИ, 1981. 60 с.
6. Пат. 2395618 РФ. Устройство для борирования элементов профилегибочных валков / В.Г. Антипанов, В.Л. Корнилов, Н.Г. Шемшурова // БИМП. 2010. №21. С. 635.
7. Киселева Е.П. Исследование влияния детонационного напыления на стойкость прокатных валков // Актуальные вопросы развития науки: сб. статей

Международной научно-практической конф. (14 февраля 2014, г. Уфа). В 6 ч. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. Ч.1 / отв. ред. А.А. Сукиасян. С. 72-74.

8. Пат. 2347008 РФ. Способ обработки ролика листопрямильной машины / В.Г.Антипанов, В.Л.Носов, В.Л.Корнилов, Г.А.Куницын // БИПМ. 2009. №5. С. 942-943.

Д.И. Кинзин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ШАБЛОНОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАНШЕТНОГО СКАНЕРА

В период работы автора ведущим инженером калибровочного бюро ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в вальцетокарном отделении появились новые станки с компьютерным ЧПУ и у многих специалистов возникли сомнения в необходимости шаблонов, которые раньше использовались при изготовлении фасонных резцов. Кроме того, что фасонные резцы больше не применялись, точность самих шаблонов, изготавливаемых вручную, оказалась существенно ниже, чем точность нарезаемых калибров, и использовать шаблоны по назначению было невозможно. Но сомнения были недолгими, так как скоро выяснилось, что при программировании станков могут возникать ошибки, а резцы в процессе работы изнашиваются и это влияет на размеры калибра. Таким образом, стало очевидным, что контроль нарезки калибров необходим и для этого нужны шаблоны соответствующей точности, которую можно получить при их изготовлении на программируемых станках (например, электроэрозионном), но возникает вопрос, как проверять сами шаблоны при возросших требованиях к точности.

Если чертежи шаблонов и калибров выполнены с помощью таких программ, как AutoCAD или Компас, то для выполнения проверки можно воспользоваться планшетным сканером. Для этого нужно разобрать штангенциркуль (рис. 1) и отсканировать шаблон вместе со штангой штангенциркуля (рис. 2), при этом шаблон не мешает помыть. Сканирование нужно производить с максимальным разрешением, как правило – это 1200 точек на дюйм (~ 0,021 мм). Из-за того, что шаблон имеет определенную толщину, при сканировании в черно-белом режиме на изображении появляется тень и граница между изобра-

жением шаблона и тенью может быть плохо различима, поэтому лучше всегда выбирать цветной режим, а для минимизации объема изображения формат jpg. После этого вы получите следующее изображение (рис. 3).



Рис. 1. Штангенциркуль



Рис. 2. Планшетный сканер



Рис. 3. Отсканированное изображение шаблона

После этого в программе (например, AutoCAD) начертим контур калибра в масштабе 1:1 (рис. 4) и вставим рядом с ним подготовленное растровое изображение шаблона (рис. 5).

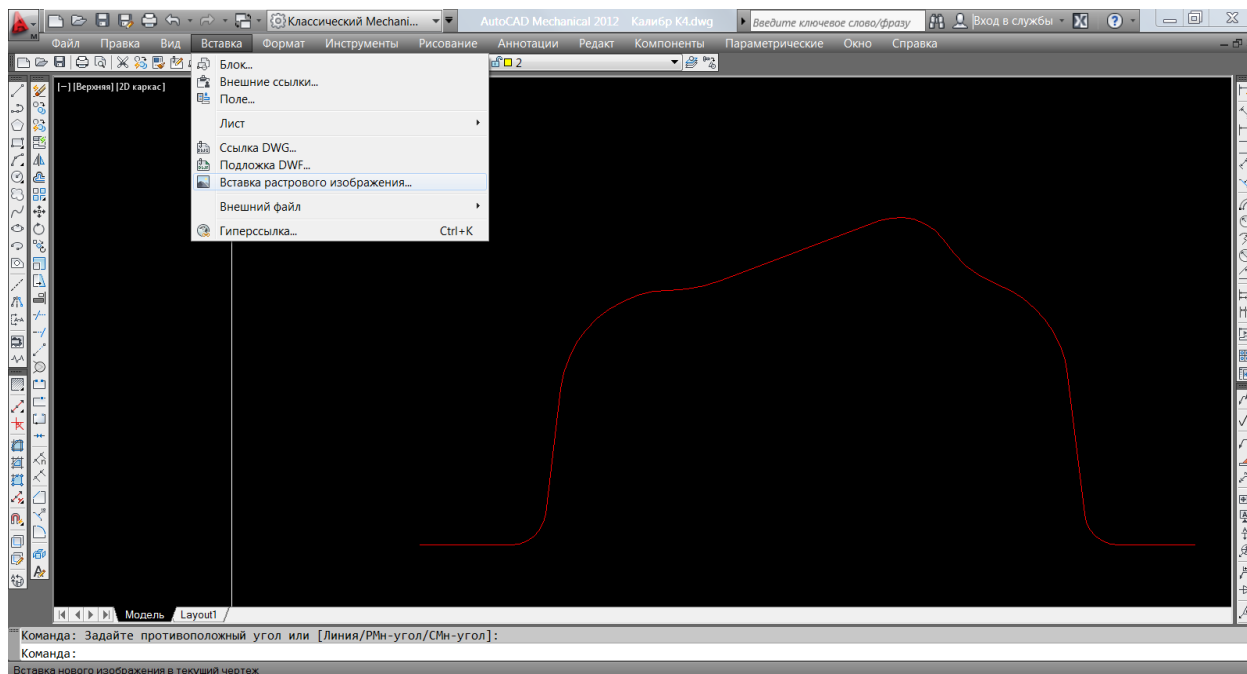


Рис. 4. Изображение контура калибра в программе AutoCAD

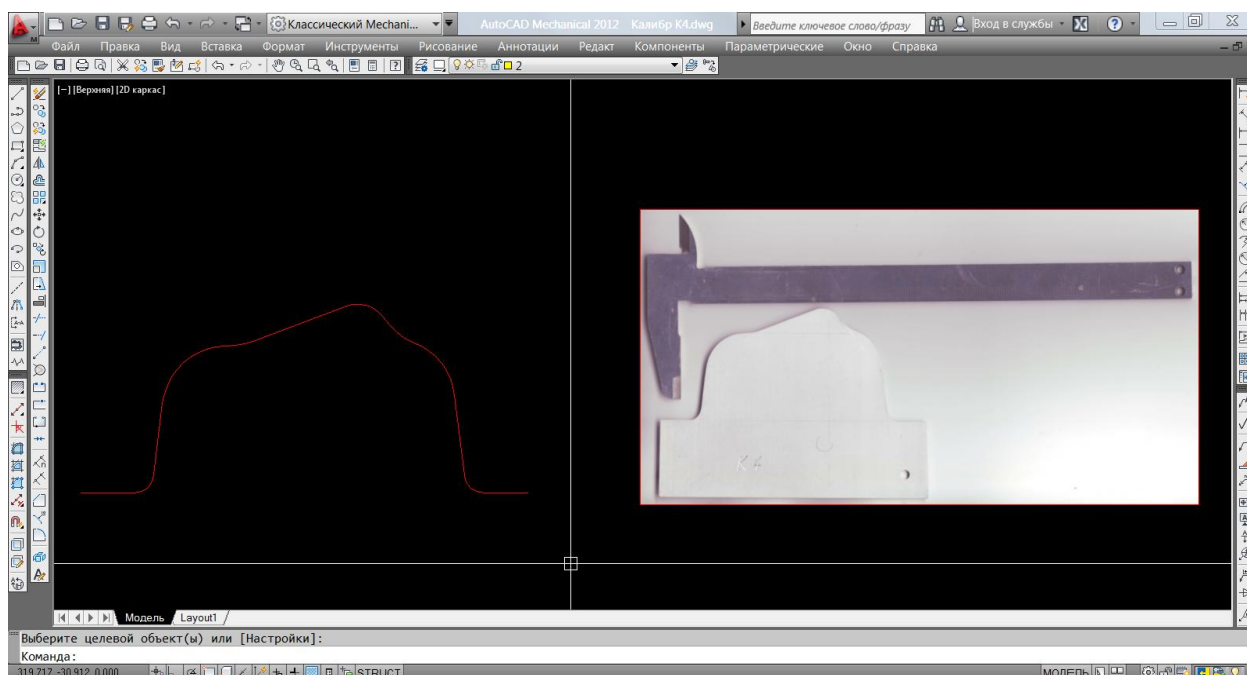


Рис. 5. Изображение шаблона,
вставленное в рабочее окно программы AutoCAD

Далее необходимо привести масштаб изображения шаблона в соответствии с масштабом вычерченного контура. Для этого выбираем команду «Параллельный размер» и, максимально увеличив изображение штангенциркуля в районе нулевой отметки, указываем начало первой выносной линии строго на конце «нулевой» риски (рис. 6), а начало второй выносной линии на конце риски, соответствующей 150 мм (чем длиннее выбранный отрезок, тем точнее удастся подобрать масштаб). Проставленный таким образом размер позволяет нам судить о масштабе изображения (рис. 7).

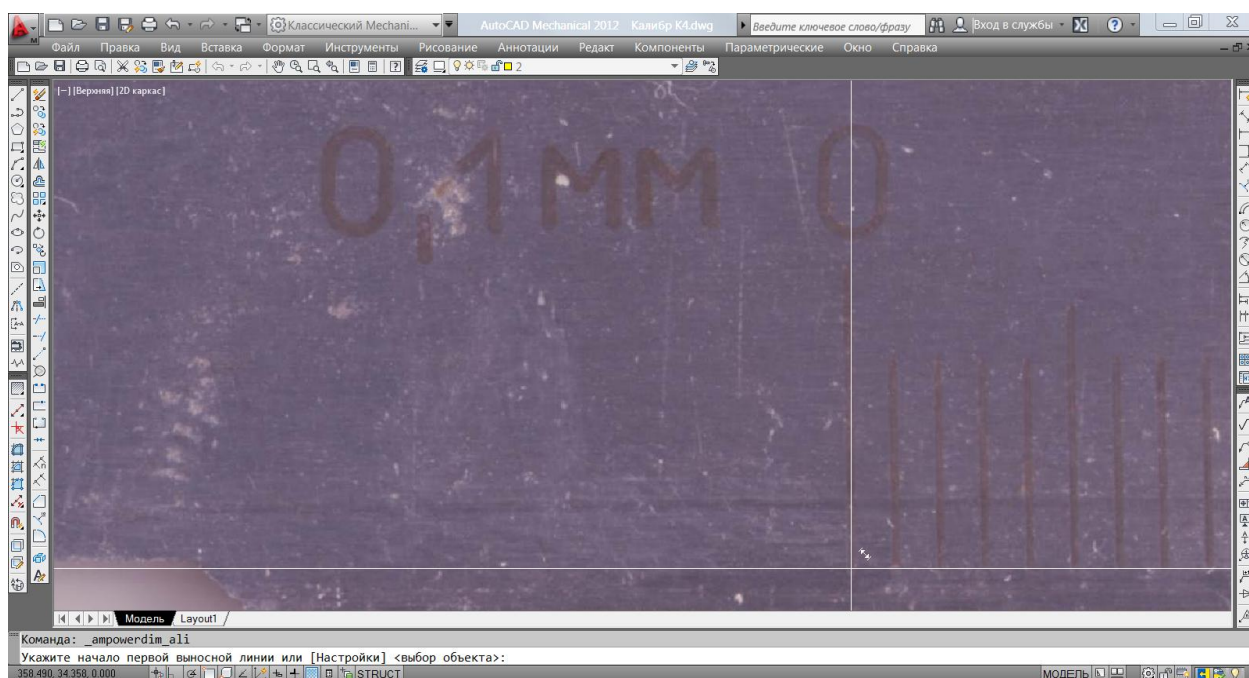


Рис. 6. Указание начала первой выносной линии при простановке размера

Увеличиваем изображение в 150/89,91 раз. Возможно, данную операцию придется повторить еще один-два раза, пока не получим точное соответствие размеров (рис. 8). Теперь необходимо повернуть изображение так, чтобы «плечики» шаблона располагались строго на одной горизонтали. Для определения угла, на который нужно осуществлять поворот, проведем две прямые: одну – соединяющую крайние точки «плечиков» шаблона, а вторую – горизонтально (рис. 9, 10). После чего, повернув изображение в горизонтальное положение,

можем наложить на него вычерченный контур для оценки их соответствия (рис. 11).

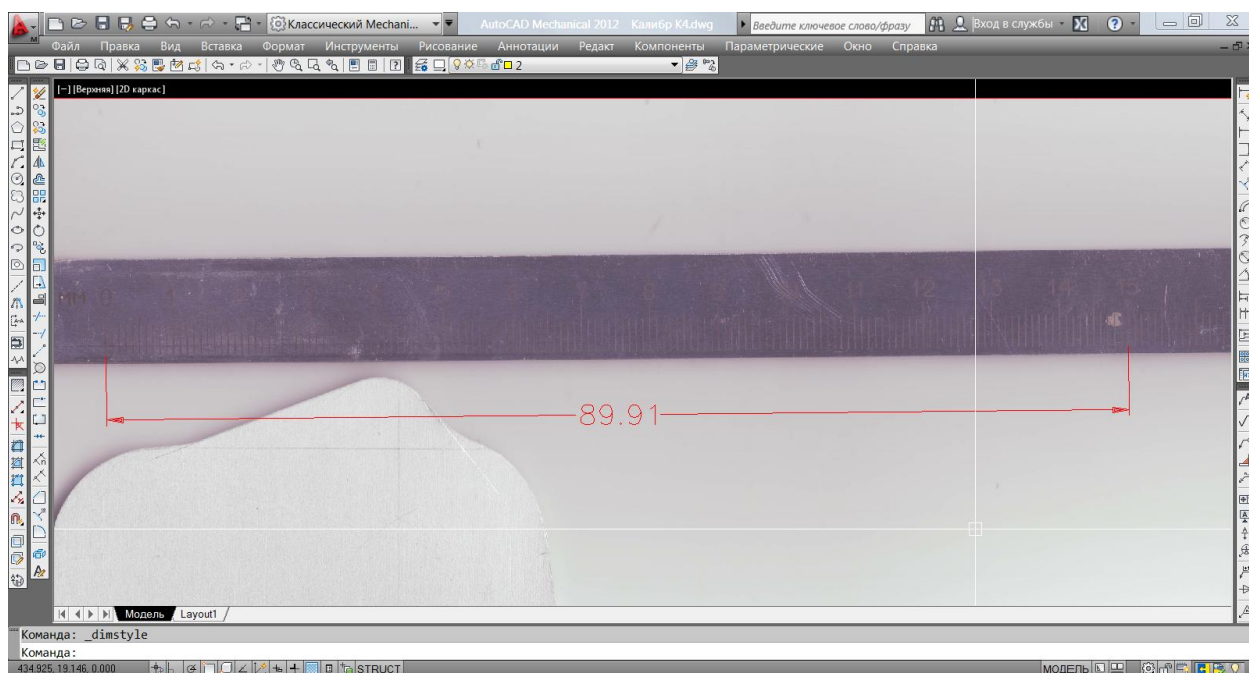


Рис. 7. Размер, проставленный на изображении шаблона

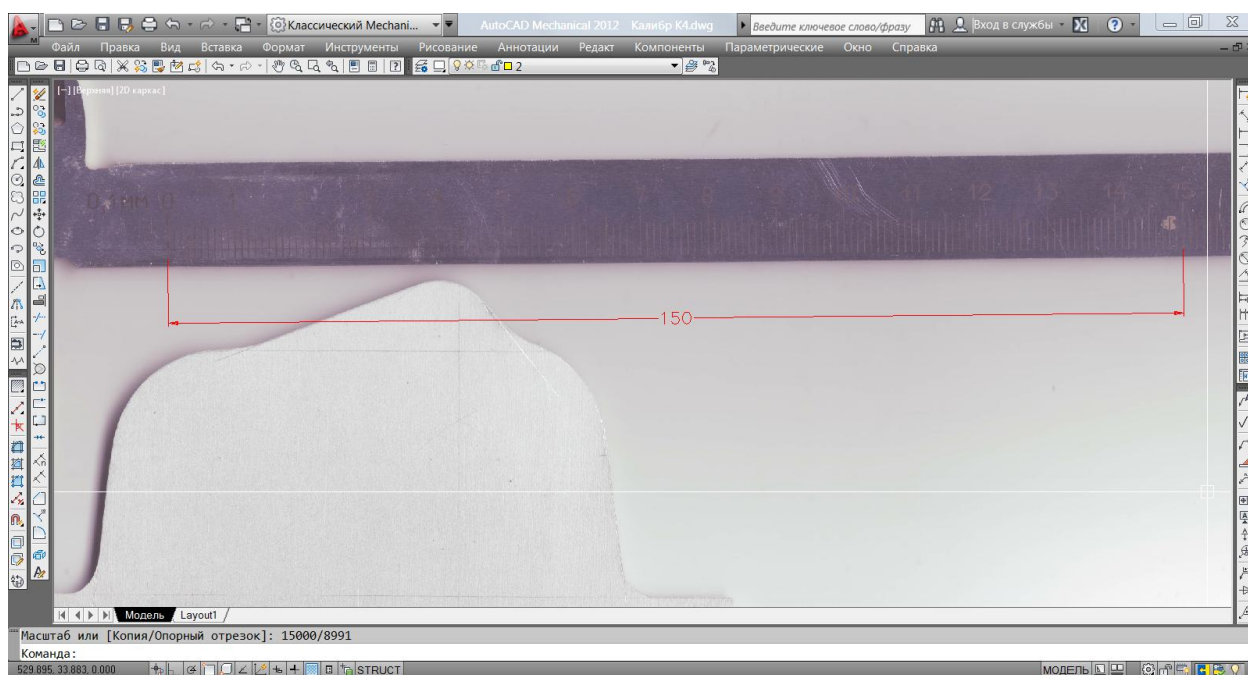


Рис. 8. Изображение шаблона в масштабе 1:1

Для того, чтобы вычерченный контур шаблона оказался поверх изображения, его нужно поместить на передний план, а изображение на задний. Уве-

личив масштаб, мы можем проследить насколько отличается реальный контур шаблона от чертежа и измерить данную величину (рис. 12).

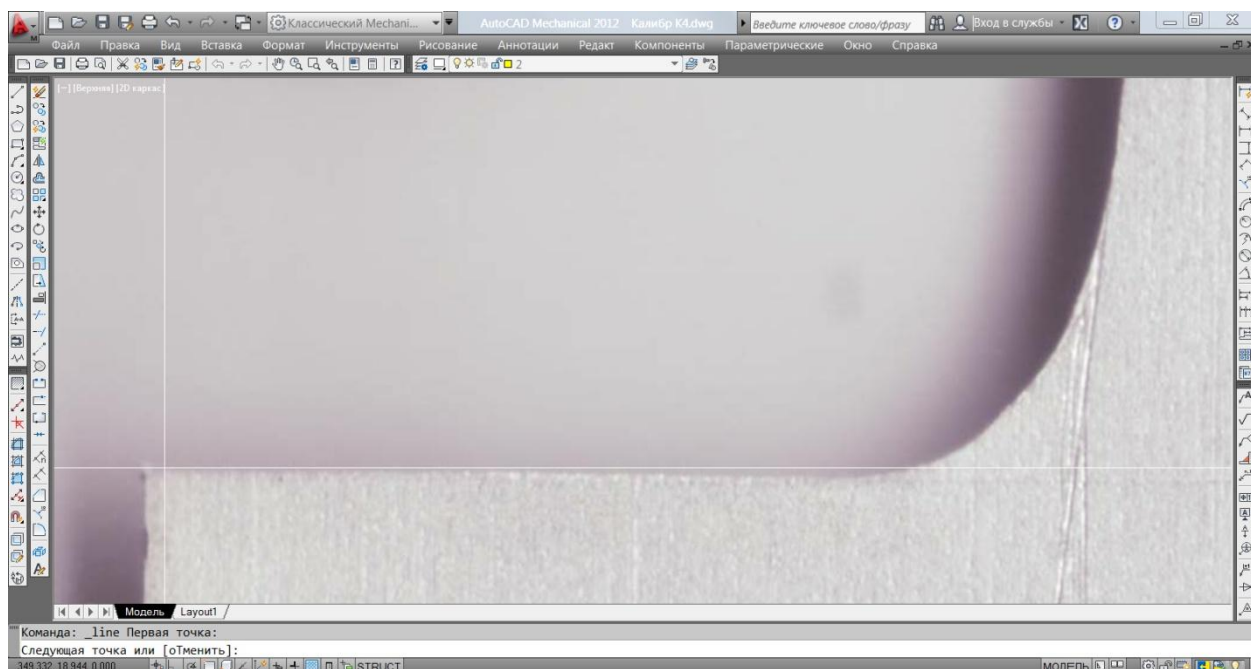


Рис. 9. Проведение прямой, соединяющей крайние точки «плечиков» шаблона

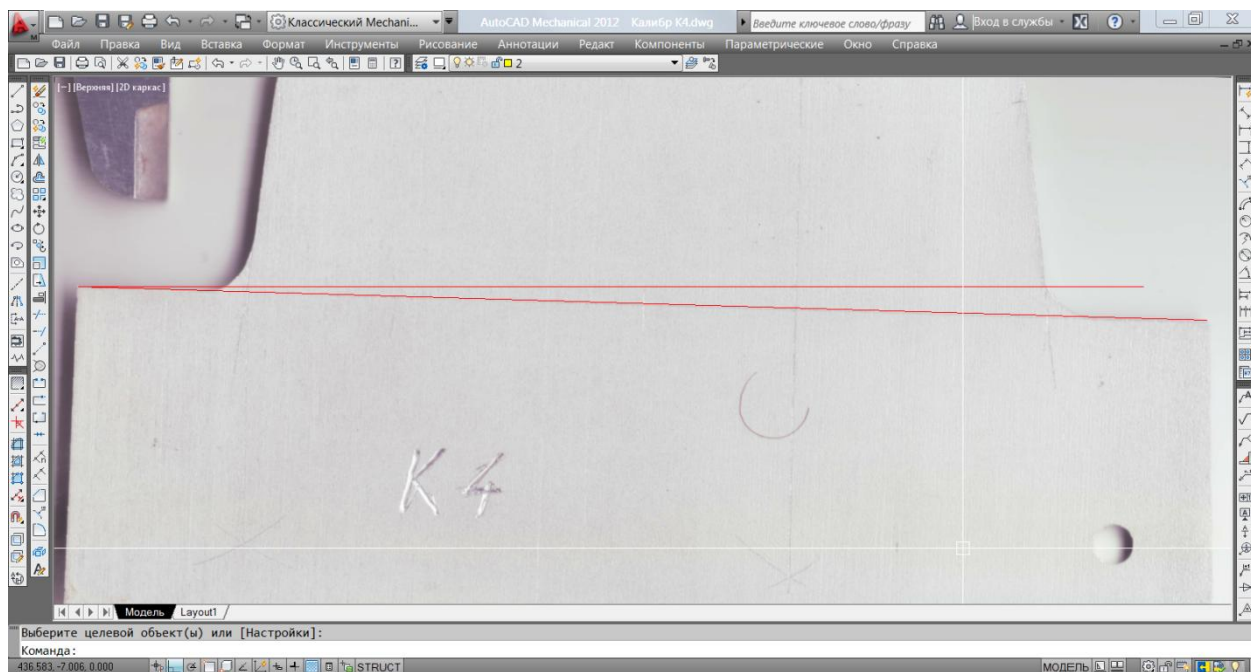


Рис. 10. Прямые, определяющие угол поворота изображения

В рассматриваемом примере использовали шаблон, изготовленный вручную, поэтому погрешность довольно значительная. Для шаблонов, изготовленных на станках с ЧПУ, совпадение контуров будет идеальным, конечно, при условии, что не было допущено ошибок при программировании станка.

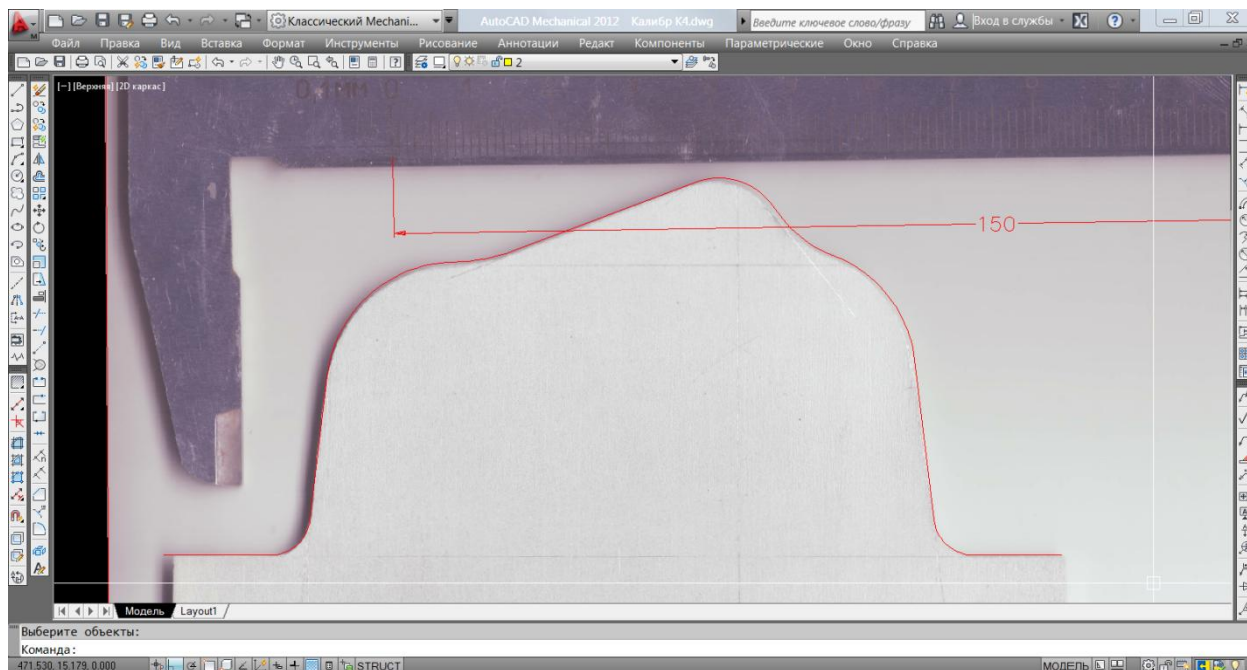


Рис. 11. Сопоставление реального и точного контуров шаблона

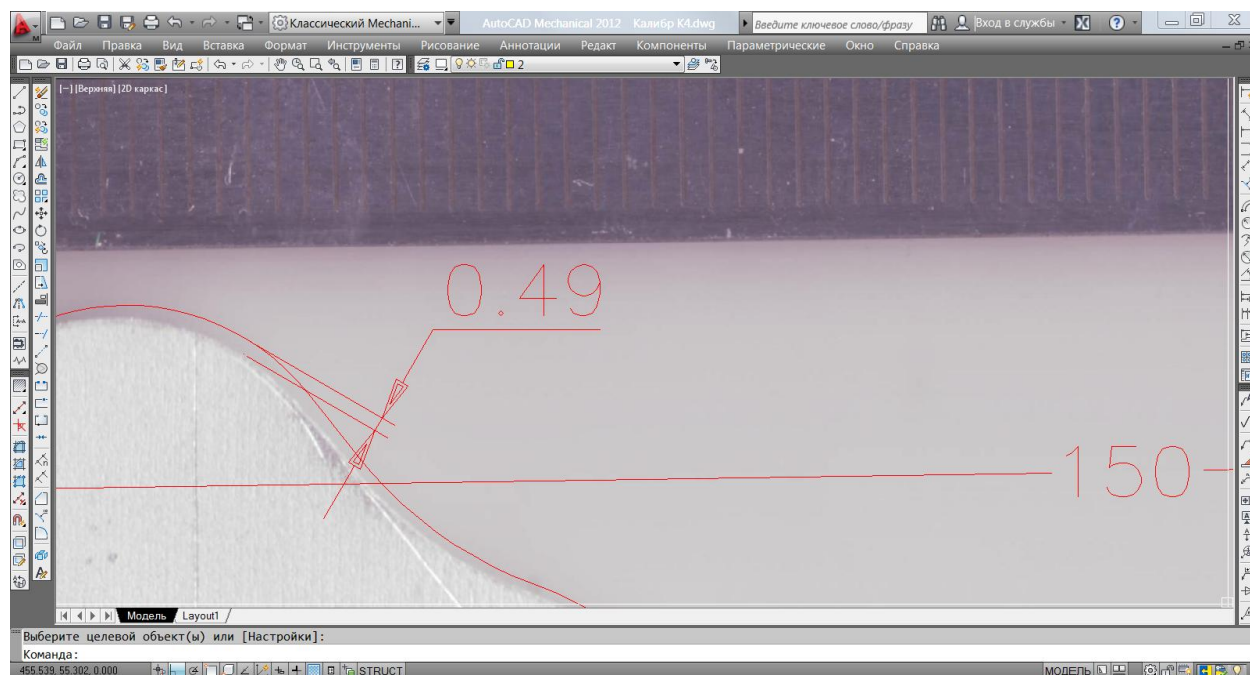


Рис. 12. Измерение погрешности изготовления шаблона

При наличии ошибки в программе станка, как правило, легко можно определить, в чем именно заключалась ошибка, и исправить ее.

Во время коренной реконструкции сортопрокатного производства на ОАО «ММК» одновременно изготавливали сотни шаблонов (в настоящее время на ММК около 1000 шаблонов), которые нужно было оперативно проверять, и предложенный автором способ позволил решить эту задачу. Кстати среди шаблонов фасонных калибров из-за ошибок программирования отбраковка составляла около 10%.

Для ускорения процедуры можно за один раз сканировать не один шаблон, а столько, сколько поместится на предметное стекло сканера. Также можно печатать чертежи калибров в масштабе 1:1 и прикладывать шаблон к напечатанному контуру. Такой способ значительно проще и быстрее, но точность в этом случае существенно ниже, кроме того, нужно помнить, что бумага при изменении температуры и влажности воздуха может значительно изменять свои размеры. Особенно этот эффект заметен при печати на лазерном принтере, который сильно нагревает бумагу. Поэтому автор не рекомендует пользоваться «бумажным» способом для шаблонов с габаритными размерами больше 50 мм.

P.S. Не забудьте собрать штангенциркуль!

Д.И. Кинзин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ. РЕШЕНИЕ ВТОРОЙ ЗАДАЧИ И УСЛОВИЕ ТРЕТЬЕЙ*

Итак – решение второй задачи.

Очевидно, что для определения площади фигуры, вырезанной из бумаги, с помощью весов необходимо знать массу и площадь эталонной фигуры, вырезанной из той же бумаги. Тогда площади искомой и эталонной фигур будут соотноситься также, как и их массы. Остается только вырезать эталонную фигуру и определить ее массу и площадь. Первое, что приходит в голову, – это начертить квадрат в качестве такого эталона. Однако построить квадрат с помощью тех инструментов, которые имеются в условии задачи, невозможно (если подходить к делу с математической строгостью). Зато можно начертить треугольник и определить его площадь по формуле Герона.

Следующая задача также связана с использованием весов, но для ее решения требуются глубокие знания теории прокатки.

Возьмем прокатный стан фирмы «KOCKS» с трехвалковыми клетями (рис. 1) (был когда-то такой на Магнитогорском комбинате). Схема калибровки десятиклетевого чистового блока показана на рис. 2. Однажды при производстве катанки диаметром 6,5 мм на стане наблюдалась следующая странная картина. При прокатке некоторых заготовок (не всех, а лишь некоторых) происходило застревание раската между 7-й и 8-й клетью чистового блока, т.е. раскат собирался в клубок между клетями, при этом передний конец раската проходил 8-ю клеть, но не доходил до валков 9-й.

* Начало читайте в предыдущих выпусках журнала

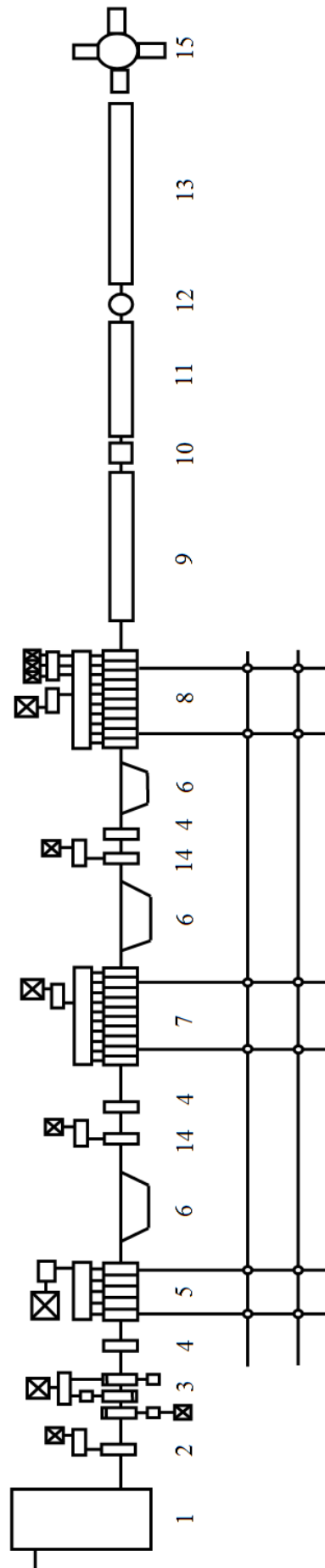


Рис. 1. Схема расположения оборудования стана:

1-печь; 2-окалиноломатель; 3-обжимная группа «дуо»; 4-летучие ножницы; 5-черновой блок клеток «500»; 6-петлевые карманы; 7-промежуточный блок клеток «370»; 8-чистовой блок клеток «290»; 9-установка водяного охлаждения; 10-виткообразователь; 11-установка воздушного охлаждения; 12-виткосборник; 13-транспортёр; 14-калибрующие клетки; 15-пакетировочное устройство

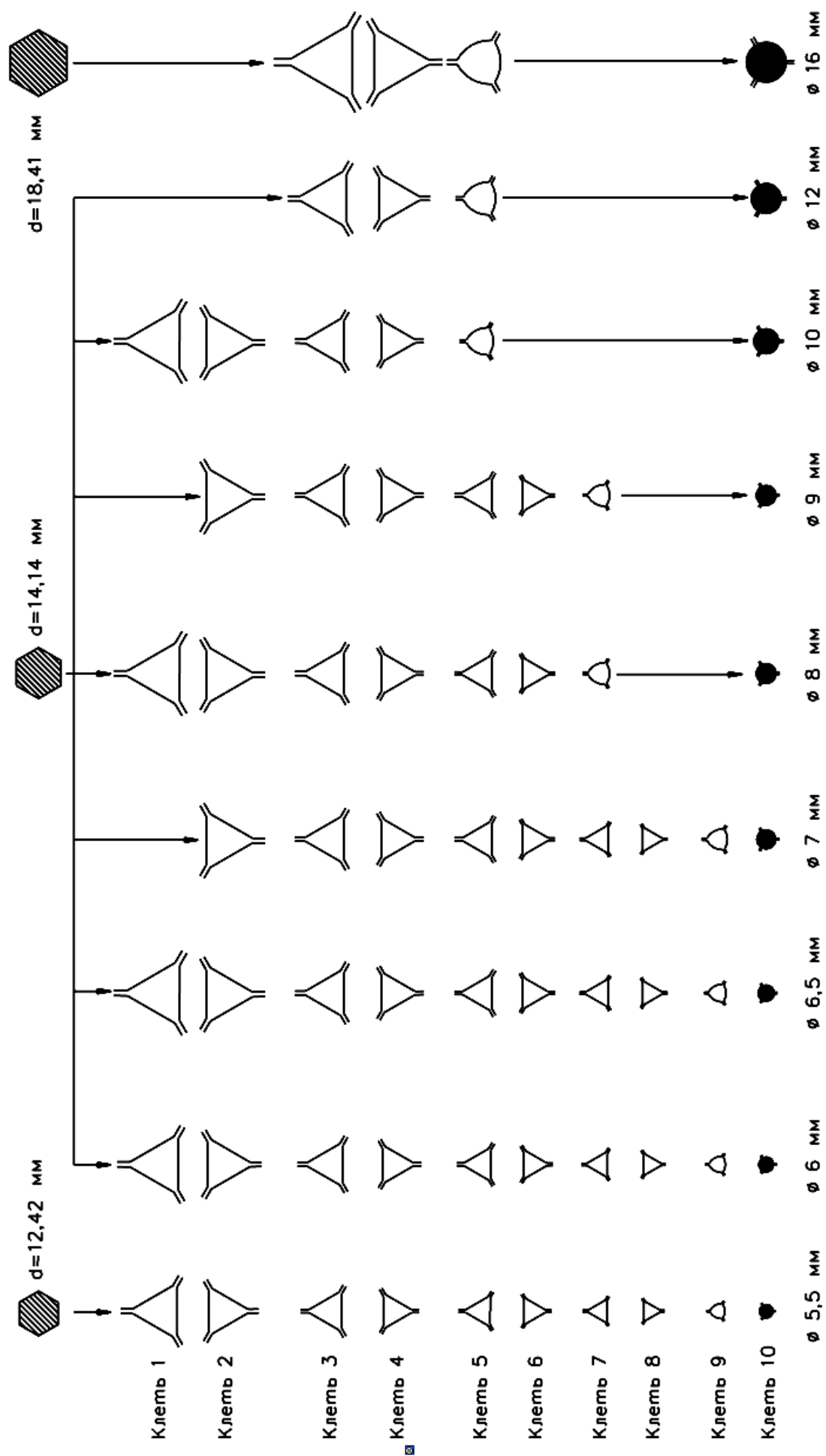


Рис. 2. Схема калибровки блока «290»

При прокатке других (опять же не всех) заготовок такое же застревание наблюдалось в средней части раската, т.е. передний конец успешно проходил через весь стан, но основная масса заготовок прокатывалась без эксцессов.

Проверки правильности установки и настройки валков и привалковой арматуры ничего не дали.

После очередного застревания были отобраны и взвешены образцы недокатов. Оказалось, что образец недоката из 7-й клетки длиной 43,75 мм весит 16,55 г, а образец недоката из 8-й клетки длиной 56,30 мм весит 21,30 г.

Можно ли по этим данным определить причину застревания?

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипанов Вадим Григорьевич – канд. техн. наук.

Кинзин Дмитрий Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология сортопрокатного производства. Тел.: 89068722849. E-mail: kinzin@mail.ru.

Киселева Екатерина Павловна – магистрант ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению «Металлургия», профиль «Прокатное производство», г. Магнитогорск. E-mail: ekaterina-kiseleva-avon@mail.ru.

Левандовский Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: управление качеством сортопрокатных технологических систем. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Моллер Александр Борисович – докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология сортопрокатного производства, управление качеством сортопрокатных технологических систем. E-mail: moller@hotmail.ru.

Ручинская Наталья Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: управление качеством сортопрокатных технологических систем.

Синицкий Олег Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология листопрокатного производства.

Таранин Иван Владимирович – аспирант кафедры машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: разработка и совершенствование методики проектирования калибровок валков для прокатки катанки и заготовки под волочение. Тел.: +79080735008. E-mail: taranin.iv@mail.ru.

Тулупов Олег Николаевич – докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология сортопрокатного производства, управление качеством сортопрокатных технологических систем. E-mail: o.tulupov@mail.ru.

Харитонов Вениамин Александрович – канд. техн. наук, профессор кафедры машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: разработка и совершенствование технологии производства проволоки и изделий из нее. Тел.: +79028658994.

Шемшурова Нина Георгиевна – канд. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: ybitut85@mail.ru.

Шитов Михаил Викторович – аспирант кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: mihailschitov@mail.ru.