

**P A S S D E S I G N . R U**



**ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ  
КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО**

**ВЫПУСК 1**

**«КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО» Электронный научный журнал. Выпуск 1**

**Дата опубликования:** 30.05.2013.

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](http://www.passdesign.ru).

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

**Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77–51759 от 23.11.2012**

© Кинзин Дмитрий Иванович

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Сортопрокатное производство .....</b>	<b>4</b>
<i>Д.И. Кинзин.</i> Разработка методики расчета уширения при прокатке в калибрах простой формы .....	4
<i>Д.И. Кинзин.</i> Оптимизация формы вытяжных калибров .....	20
<i>С.С. Рычков, Д.И. Кинзин.</i> Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы .....	29
<i>А.Б. Стеблов, В.Н. Асанов, С.Н. Березов.</i> Калибровка для микростана по производству строительной арматуры .....	43
<i>В.В. Арцибашев.</i> Описание формоизменения сплошной среды при моделировании различных способов обработки металлов давлением с использованием матричной модели .....	47
<i>А.С. Лимарев, Ю.А. Шаймарданова.</i> Улучшение качества реза полосового проката для автомобильных рессор .....	50
<i>С.А. Левандовский.</i> К вопросу о дискретизации описания формы калибров .....	56
<b>Научно-популярная рубрика .....</b>	<b>66</b>
<i>Д.И. Кинзин.</i> Занимательные технологические задачи. Задача первая .....	66
<b>Сведения об авторах .....</b>	<b>68</b>

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ ПРОСТОЙ ФОРМЫ**

*В статье рассматривается вывод единой формулы для расчета уширения при прокатке на гладкой бочке и в двухвалковых калибрах простой формы.*

*Ключевые слова: прокатка в калибрах, формоизменение, уширение.*

Несмотря на обширный экспериментальный и теоретический материал, имеющийся в литературе, вопросы расчета показателей формоизменения и энергосиловых параметров не являются изученными в степени, достаточной для решения конкретных задач прокатного производства и, в частности, для расчетов калибровок валков. Подтверждением этому является то обстоятельство, что большинство профессиональных калибровщиков при расчетах уширения до сих пор опираются на собственный опыт и интуицию, чем на строго разработанные научные методики. Такое положение объясняется целым рядом причин. Прежде всего, следует отметить, что большая часть экспериментальных исследований и имеющихся формул для расчета показателей формоизменения и энергосиловых параметров относятся к простейшему случаю прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках. Формулы, которые выводятся специально для случая прокатки в калибрах, имеют достаточно узкий спектр применения, так как работают только для типовых систем калибров.

При этом для решения многих практических задач, например, оптимизации калибровки простых сортовых профилей, необходима единая аналитическая формула расчета уширения, которая подходила бы для любых типов и форм простых калибров. Проведенное исследование литературных источников показало, что на сегодняшний день подобной методики, которая отвечала бы

требованиям необходимой простоты и универсальности, не существует. В связи с этим в данной главе решается задача разработки единой формулы для расчета среднего показателя поперечной деформации при прокатке в калибрах простой формы.

## **1. Выбор базовых положений для разработки методики оценки уширения**

С практической точки зрения в подавляющем большинстве случаев нет нужды в определении напряженно-деформированного состояния в каждой точке очага деформации, тогда как расчет средних параметров позволяет решать многие важные технические задачи: оптимального управления технологическим процессом, определения размеров заготовки и параметров деформирующего инструмента, расчета режимов обжатий и конечного формоизменения. Преимущество подобных методик по сравнению с вариационными методами заключается в их простоте и в некоторых случаях возможности получения аналитического решения, хотя за это приходится платить некоторой потерей точности [1]. Вариационные методы механики твердого деформируемого тела позволяют получать более точное решение задачи конечного формоизменения и определять поля распределения различных параметров в объеме деформируемого тела. Однако использование данных методов сопряжено со значительными вычислительными трудностями, тем более при численном решении задач оптимизации технологических процессов ОМД, когда многократно приходится определять напряженно-деформированное состояние при варьировании технологических параметров. Кроме того, получение очень точных результатов при определении напряженно-деформированного состояния может оказаться бесполезным при разработке оптимальных технологических режимов в силу того, что в реальных условиях имеют место постоянное колебание различных технологических параметров (температуры раската, размеров заготовки, обжатия, скорости прокатки) и износ деформирующего инструмента.

Таким образом, для решения многих технологических задач сортопрокатного производства необходима простая и адекватная аналитическая формула, отражающая зависимость средних показателей формоизменения от основных факторов. Постановка подобной задачи не может быть успешно осуществлена без правильной количественной оценки величины уширения, в качестве меры которой, чаще всего, принимают абсолютные или относительные изменения размеров деформируемого тела. Тогда как при прокатке в калибрах приращение ширины не может быть мерой поперечной деформации, так как в зависимости от формы калибра и степени заполнения его металлом можно получить большее увеличение ширины полосы при меньшей поперечной деформации и наоборот. Правильная количественная оценка величины деформации предполагает интегрирование относительных изменений размеров тела в соответствующих пределах, что позволяет получать истинную деформацию [2]. Поэтому в качестве показателя уширения правильнее использовать величину смещенного объема металла в поперечном направлении. Однако подобный показатель уширения используют сравнительно немногие авторы [3].

Обзор методик расчета средних показателей формоизменения металла при прокатке показывает, что большинство теоретических методик основано на анализе формоизменения прямоугольного параллелепипеда при равномерной осадке, так как осадка параллелепипеда и процесс прокатки, в том числе и в калибрах, могут рассматриваться как достаточно близкие процессы. «Процесс осадки параллелепипеда выбирается как типичный процесс с трехмерным характером формоизменения, когда условие постоянства объема для определения даже средних размеров параллелепипеда после деформации между плоскими бойками на заданную величину бывает недостаточно (в отличие, например, от случая осадки цилиндрической заготовки, когда по заданным начальным размерам требуется определить средний диаметр заготовки после осадки ее плоскими бойками до заданной высоты). Многие авторы рассматривали в своих исследованиях осадку параллелепипеда как ключевой процесс для понимания

закономерностей формоизменения в различных процессах обработки давлением» [1].

Таким образом, выберем в качестве базового процесса для разработки методики определения уширения при прокатке в калибрах простой формы процесс осадки прямоугольного параллелепипеда в плоских бойках. Будем определять только средние показатели формоизменения в виде истинных деформаций.

## **2. Процесс осадки параллелепипеда как типичный процесс с трехмерным характером формоизменения**

Для выявления основных закономерностей трехмерного течения металла будем рассматривать типичный и наиболее простой процесс осадки прямоугольного параллелепипеда. При этом даже такая простая задача решается достаточно трудно. Поэтому необходимо найти допущения, упрощающие систему уравнений теории пластичности, которые позволят решить поставленную нами задачу.

Среди приведенных ниже допущений нет чего-то нового, чтобы не использовалось ранее другими авторами. Мы лишь применили новую комбинацию данных допущений, что было необходимо для разработки единой зависимости, позволяющей определять средние показатели формоизменения при прокатки в калибрах простой формы.

Рассмотрим допущения, которые были приняты для выявления основных закономерностей течения металла при осадке прямоугольного параллелепипеда (рис. 1).

Как и многие другие исследователи [2-8] воспользуемся инженерным методом, в соответствии с которым будем считать, что по направлению высоты параллелепипеда действует максимальное главное напряжение, а по направлениям длины и ширины параллелепипеда – среднее и минимальное напряжение. Какое из напряжений является минимальным, определяется соотношением длины и ширины контактной поверхности.

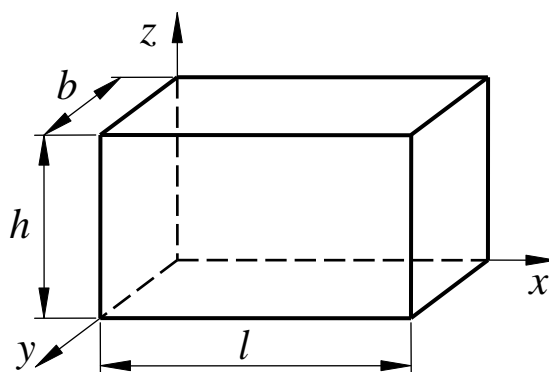


Рис. 1. Осадка прямоугольного параллелепипеда

Далее, по примеру И.Я.Тарновского, рассмотрим кинематическую схему истечения металла при осадке прямоугольного параллелепипеда. Как известно, при равномерной осадке или при полном отсутствии внешнего трения осуществляется радиальная схема течения. Другим предельным случаем является нормальная схема течения металла, которая имеет место при существенном влиянии внешнего трения и вытекает из предположения, что материал всегда стремится перемещаться в направлении наименьшего сопротивления, а направление нормалей к контуру поверхности контакта, дающее кратчайшее расстояние от взятой точки до контура, есть направление наименьшего сопротивления. По всей высоте параллелепипеда биссектрисы, проведенные из углов прямоугольной поверхности контакта, образуют плоскости, делящие объем параллелепипеда на четыре части, а именно: на две треугольные и две трапециевидальные призмы. На основании такого представления о процессе течения можно сказать, что весь металл, смещаемый при осадке по основаниям треугольных призм, перемещается в направлении наибольшей стороны прямоугольного основания, а металл, смещаемый по основаниям трапециевидальных призм, в направлении наименьшей стороны этого основания. В реальных условиях осадки кинематическая схема течения металла будет промежуточной между нормальной и радиальной (рис. 2) [2].



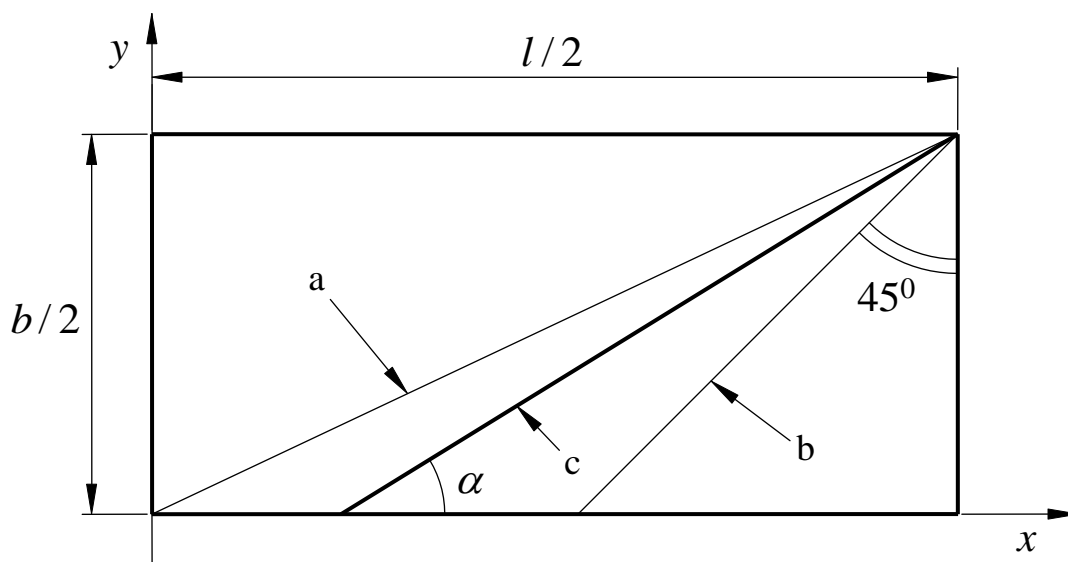


Рис. 2. Схема к определению положения плоскости симметрии напряжений и деформаций для радиальной (а), нормальной (b) и промежуточной (с) схем течения металла

Условно будем считать, что весь объем, смещенный по высоте треугольной призмы, идет только на приращение длинной стороны поперечного сечения, а объем, смещаемый по высоте трапециевидальных призм, идет на приращение короткой стороны.

Тангенс угла наклона плоскости симметрии напряжений и деформаций будем определять по формуле И.Я.Тарновского [2]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{2l} \left[ 1 + \left( \frac{b}{l} \right)^{-4f} \right], \quad (1)$$

где  $b$  и  $l$  – ширина и длина параллелепипеда;

$f$  – коэффициент трения.

Рассмотрим некоторые частные случаи.

При отсутствии внешнего трения имеет место равномерная осадка и из уравнения (1) получим  $\operatorname{tg} \alpha = b/l$ , что соответствует радиальной схеме истечения металла. При неравномерной осадке параллелепипеда с квадратным поперечным сечением  $b/l = 1$  и из уравнения (1) получим  $\operatorname{tg} \alpha = 1$  при любом зна-

чении коэффициента внешнего трения. При нормальной схеме истечения  $\operatorname{tg} \alpha = 1$ . Если при осадке коэффициент трения достаточно велик и при этом  $\operatorname{tg} \alpha > 1$ , то имеет место нормальная схема истечения металла и тангенсу угла присваиваем значение единица. В других случаях имеет место промежуточная схема [2].

Определив положение плоскости симметрии напряжений и деформаций, можно вычислить площади поперечного сечения треугольных и трапециевидальных призм, а так как мы условились считать, что смещенные объемы по высоте данных призм перемещаются в различных направлениях, то получаем следующую зависимость для определения соотношения смещенных объемов металла в длину и ширину:

$$\frac{V_x}{V_y} = \frac{A_x}{A_y}, \quad (2)$$

где  $V_x$  и  $V_y$  – смещенные объемы металла в длину и ширину;

$A_x$  и  $A_y$  – площади поперечного сечения треугольной и трапециевидальной призм (рис. 3).

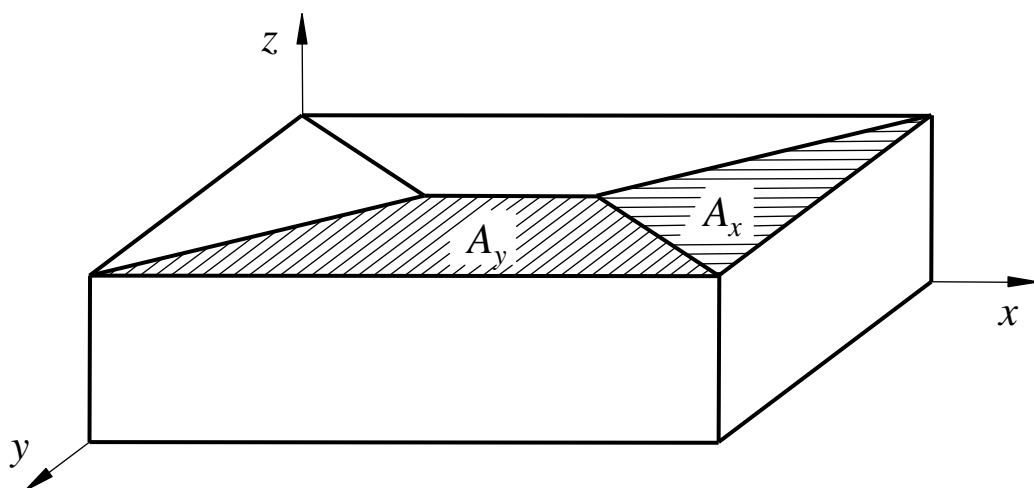


Рис. 3. Площади поперечного сечения треугольной и трапециевидальной призм

Или, сократив объемы металла:

$$\frac{\ln \mu}{\ln \beta} = \frac{A_x}{A_y}, \quad (3)$$

где  $\mu$  и  $\beta$  – коэффициенты вытяжки и уширения.

Воспользовавшись формулой (3) и законом постоянства объема можно, вычислить коэффициенты деформации параллелепипеда.

### **3. Распространение закономерностей формоизменения при осадке параллелепипеда на прокатку в гладких валках и калибрах простой формы**

Процесс прокатки металла как в гладких валках, так и в калибрах будем рассматривать как близкий к процессу осадки прямоугольного параллелепипеда по своим основным закономерностям формоизменения. Тогда для случая прокатки в гладких валках будет справедлива формула (3), то есть отношение действительной деформации будет равно отношению площадей, являющихся зонами контактной поверхности, смещенные объемы по высоте которых идут на приращение длины и ширины прокатываемой полосы соответственно.

Таким образом, для определения уширения металла при прокатке в гладких валках достаточно вычислить параметры  $A_x$  и  $A_y$ . Для этого упростим сложную форму контактной поверхности до соответственного прямоугольника, ширину и длину которого будем определять из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_c}{l_c} &= \frac{b_1}{l_{од}^{макс}} \\ b_c l_c &= F_{\kappa} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $b_c$  и  $l_c$  – размеры соответственной контактной поверхности;

$b_1$  – ширина раската на выходе из валков;

$l_{od}^{макс}$  – максимальная длина очага деформации;

$F_k$  – площадь контактной поверхности.

Определив размеры соответственной контактной поверхности и воспользовавшись формулой (1) для определения угла наклона плоскости симметрии напряжений и деформаций, можем вычислить площади  $A_x$  и  $A_y$  и, как следствие, величину уширения.

При вычислении ширины и длины соответственной контактной поверхности необходимо учитывать тот факт, что форма контактной поверхности может быть как узкой, так и широкой, а так как в выражении (1)  $b$  – это всегда меньшая сторона, то для узких очагов деформаций буквой  $b$  будем обозначать ширину контактной поверхности, а для широких – длину.

Проведем анализ формулы (3) и построим график зависимости отношения действительных деформаций от коэффициента трения  $f$  и формы контактной поверхности  $b_1/l_{od}^{макс}$  (рис. 4). Полученный график можно разделить на две характерные части:  $b_1/l_{od}^{макс} > 1$  (широкий очаг деформации) и  $b_1/l_{od}^{макс} < 1$  (узкий очаг деформации).

При  $b_1 = l_{od}^{макс}$  смещенные объемы металла в продольном и поперечном направлениях равны независимо от коэффициента трения, так как его изменение приводит к одинаковым изменениям напряжений, действующих в продольном и поперечном направлениях. При прокатке в калибрах картина будет иметь более сложный вид из-за появления еще одного фактора – формы калибра.

Для определения максимальной длины контактной поверхности и площади контакта воспользуемся хорошо разработанным и подходящим для этих целей векторным описанием очага деформации, являющимся одной из составных частей структурно-матричного подхода к моделированию процессов сортовой прокатки [9-13]. Данный метод позволяет достоверно определять геометрические параметры очага деформации, так как представляет собой его дискретное описание, точность которого может быть практически любой (рис. 5).

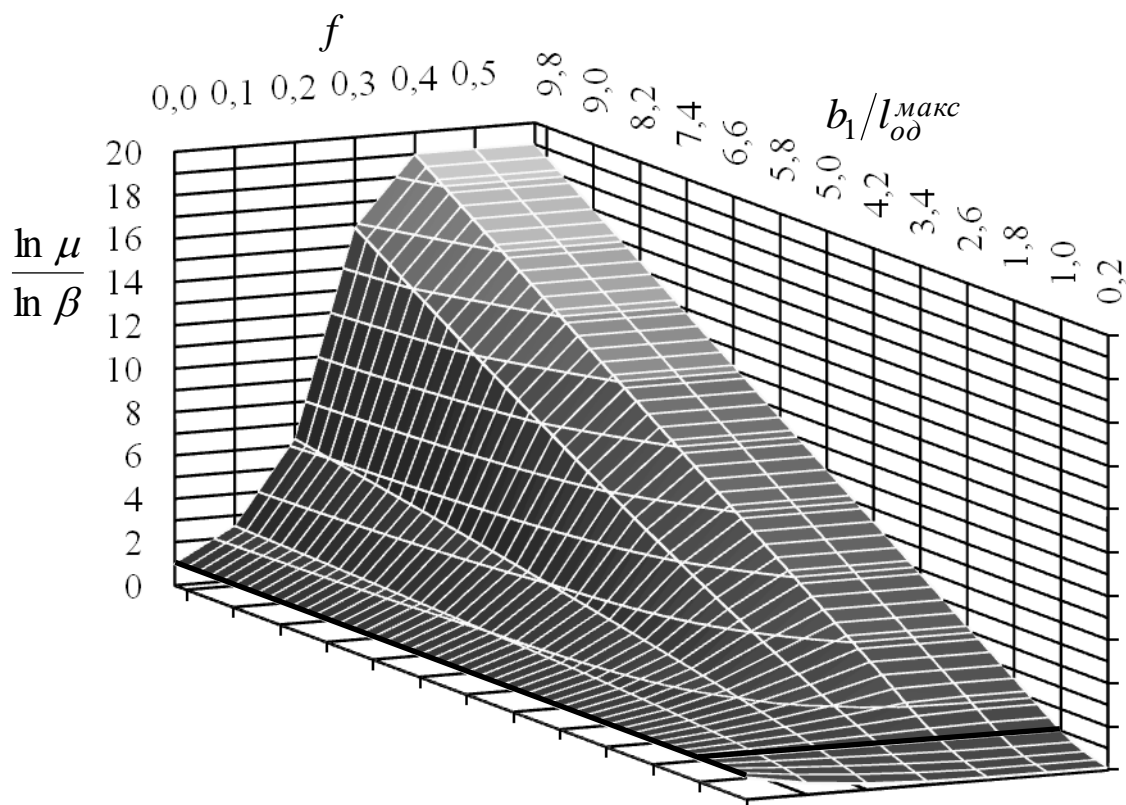


Рис. 4. График зависимости отношения действительных деформаций от коэффициента трения и формы контактной поверхности

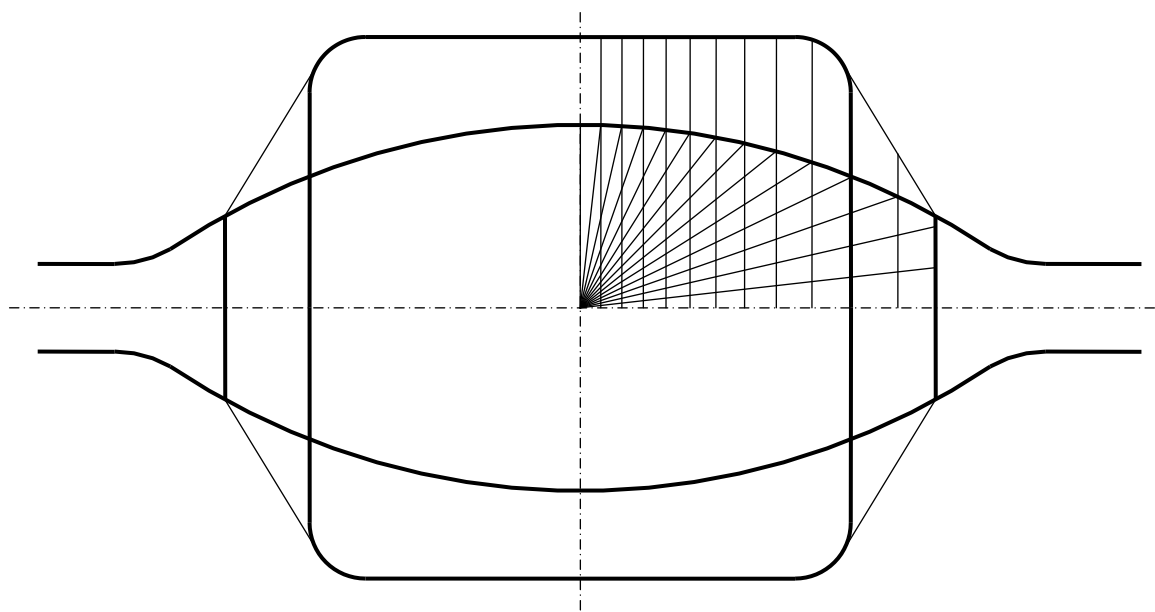


Рис. 5. Векторное описание очага деформации

Такое описание позволяет разбить очаг деформации на тонкие слои и определить длину каждого слоя  $a$ , значит, и площадь контакта металла с валком.

Данный способ расчета по своей сути является формализацией графического метода [14, 15], который имеет такую же точность и универсальность определения площади контакта металла с валком, но вместе с тем легко поддается автоматизации расчетов на ЭВМ.

Далее получим общую формулу для расчета уширения не только при прокатке в гладких валках, но и в калибрах.

Допустим, что гладкие валки приобрели вогнутость и превратились в овальный калибр (рис. 6) (пунктиром на рисунке показаны контуры гладких валков).

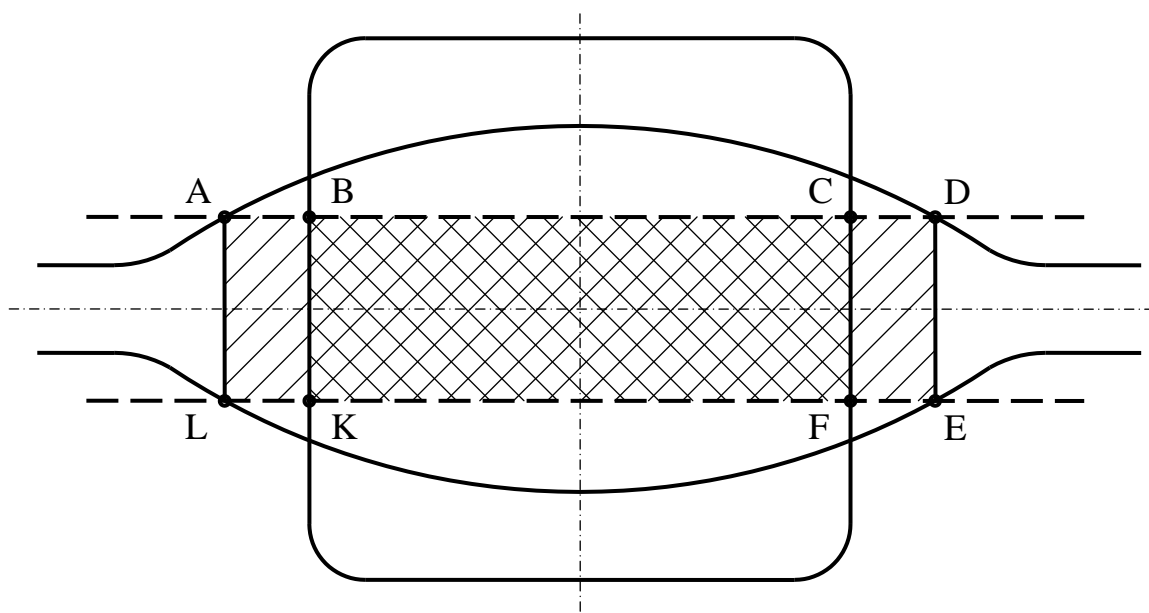


Рис. 6. Схема к выводу формулы для расчета уширения при прокатке в калибрах

Предположим, что трение на контакте металла с валком изменилось таким образом, что уширение осталось прежним. Тогда смещенный объем металла в продольном направлении (в направлении вытяжки) увеличится на ту величину, на которую возросла площадь выходящего сечения при переходе от гладкой бочки к овальному калибру. Отсюда получаем следующую формулу:

$$\ln \mu = \frac{A_x}{A_y} \cdot \frac{S_1}{S_2} \ln \frac{S_2}{S_n}, \quad (5)$$

где  $S_1$  – площадь выходящего сечения;

$S_2$  – площадь фигуры ADEL;

$S_n$  – площадь фигуры BCFK.

Данные рассуждения будут справедливы и для других видов калибров (рис. 7). Таким образом, мы получили формулу для расчета уширения при прокатке металла в калибрах простой формы.

На основе выражения (5) была разработана САПР калибровок простых сортовых профилей, отличающаяся большой универсальностью и гибкостью. Однако из-за того, что в основе методики лежит рекуррентное уравнение, связывающее сложным образом различные геометрические параметры очага деформации, расчет показателей формоизменения для стана из двадцати клеток может занимать значительное время, что обусловлено алгоритмом расчета, который представляет собой постепенное приращение ширины профиля и проверку на каждом шаге степени приближения к решению.

Для снижения вычислительной сложности методики расчета уширения упростим уравнение (5) путем явного выражения параметра  $S_1$  через остальные. Для этого воспользуемся разложением логарифма в ряд Дж. Грегори [16]:

$$\ln \frac{M}{N} = 2 \left\{ \frac{M - N}{M + N} + \frac{1}{3} \left( \frac{M - N}{M + N} \right)^3 + \frac{1}{5} \left( \frac{M - N}{M + N} \right)^5 + \dots \right\}. \quad (6)$$

Данный ряд быстро сходится при отношении  $M/N$  близком к единице, что соответствует коэффициенту вытяжки, поэтому даже первый член ряда дает весьма точное приближение значения логарифма:

$$\ln \frac{S_0}{S_1} \cong 2 \frac{S_0 - S_1}{S_0 + S_1}, \quad (7)$$

где  $S_0$  – площадь входящего сечения.

Однако при такой замене получим квадратное уравнение относительно  $S_1$ , что не совсем удобно. Поэтому воспользуемся дальнейшим разложением

полученного выражения в ряд Тейлора в окрестности точки  $S_1 = S_T$ , что соответствует теоретической вытяжке, т.е. прокатке без уширения:

$$\ln \frac{S_0}{S_1} \cong 2 \frac{S_0 - S_1}{S_0 + S_1} \cong 2 \frac{S_0 - S_T}{S_0 + S_T} - 4 \frac{S_0(S_1 - S_T)}{(S_0 + S_T)^2}. \quad (8)$$

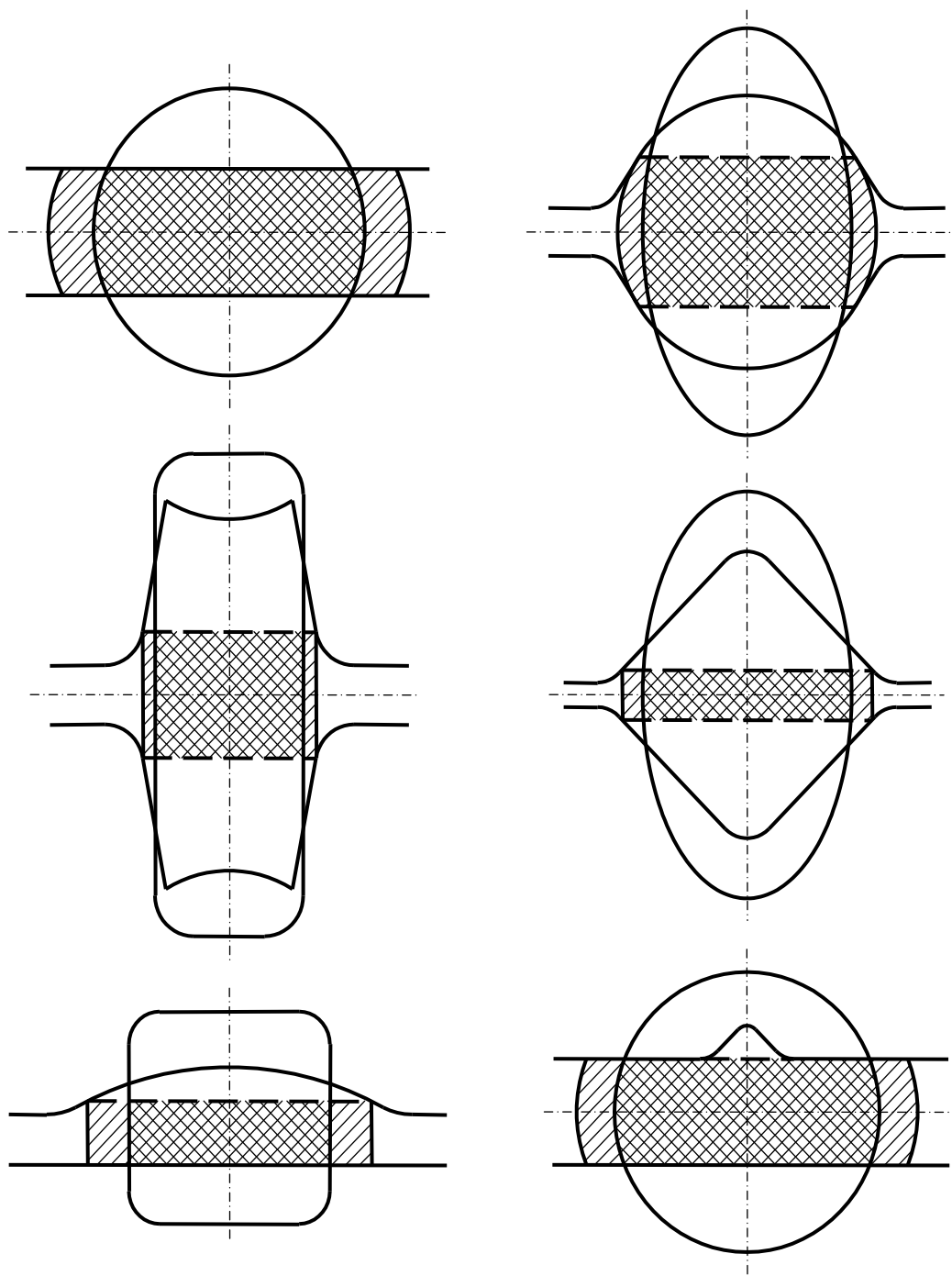


Рис. 7. Примеры площадей  $S_z$  и  $S_n$  для различных калибров



При этом мы получим линейную зависимость  $S_1$  от прочих параметров. Однако точность данного выражения сравнительно невелика, но потерю точности можно компенсировать следующей заменой:

$$2 \frac{S_0 - S_T}{S_0 + S_T} \cong \ln \frac{S_0}{S_T}. \quad (9)$$

В результате получим:

$$\ln \frac{S_0}{S_1} \cong \ln \frac{S_0}{S_T} - 4 \frac{S_0(S_1 - S_T)}{(S_0 + S_T)^2}. \quad (10)$$

При этом выражение (10) не только преобразует коэффициент вытяжки в линейное уравнение относительно  $S_1$ , но и имеет большую точность, чем формула (7).

В итоге получаем:

$$S_1 = \frac{\ln \frac{S_0}{S_T} + \frac{4S_0S_T}{(S_0 + S_T)^2}}{\frac{A_x}{A_y S_z} \ln \frac{S_z}{S_n} + \frac{4S_0}{(S_0 + S_T)^2}}. \quad (11)$$

Задавая в первом приближении ширину раската, равной ширине входящего сечения, определяем площадь поперечного сечения по формуле (11), а через площадь находим новое приближение ширины выходящего сечения. Продолжая данный цикл до удовлетворительной точности, получаем приближенное решение уравнения (11), что позволит на порядок быстрее найти решение.

#### 4. Заключение

Полученная методика расчета уширения позволяет достаточно быстро и точно определять основные технологические параметры для широкого диапазона простых сортовых калибров, что дает возможность проанализировать большое количество вариантов технологических решений и выбрать из них оп-

тимальное по производительности, стабильности, энергоэффективности, себестоимости, качеству продукции и другим критериям. Такая многовариантность и гибкость повышает эффективность работы технологов как при проектировании оборудования прокатных станов, так и при разработке и совершенствовании процессов на действующих агрегатах. Высокая скорость расчетов и гибкость САПР позволяет решать нестандартные производственные задачи в короткие сроки, что имеет существенное значение для действующего производства.

### **Библиографический список**

1. Вайсбурд Р.А., Залазинский А.Г. Развитие исследований формоизменения в процессах, близких к осадке параллелепипеда // Актуальные проблемы теории и практики обработки металлов давлением: Сб. трудов УГТУ Екатеринбург, 1998. Вып. 3. С.24-40.
2. Тарновский И.Я. Формоизменение при пластической обработке металлов. М.: Metallurgizdat, 1954. 532 с.
3. Минкин А.В. Расчет систем вытяжных калибров. М.: Metallurgiya, 1989. 207 с.
4. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьковском ун-те, 1981. 248 с.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1968. 684 с.
6. Аркулис Г.Э, Дорогобид В.Г. Теория пластичности. Учебное пособие для вузов. М.: Metallurgiya, 1987. 352 с.
7. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление металлов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
8. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

9. Эффективность деформации сортовых профилей / С.А.Тулупов, Г.С.Гун, В.Д.Онискив и др. М.: Металлургия, 1990. 280 с.
10. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 2. С. 48–50.
11. Тулупов С.А., Тулупов О.Н. Матрично-статистическая модель формоизменения / Магнитогорск. горно-металлург. ин-т. Магнитогорск, 1988. Деп. в ин-те Черметинформация. №3/Д–1412
12. Тулупов С.А. Разработка математической модели формоизменения металла в вытяжных калибрах на базе векторно-матричного способа представления процесса // Краевые задачи: Межвуз. сб. научн. трудов. Пермь, 1988.
13. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: Дис. ... докт. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 385 с.
14. Тринкс В. Калибровка прокатных валков. Часть 1. Объединен. научно-тех. изд. НКТП СССР, 1934. 144 с.
15. Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургия, 1970. 509 с.
16. Математический энциклопедический словарь./ Гл. ред. Прохоров Ю.В. М.: Советская энциклопедия, 1988. 847 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ

*В статье представлена постановка и решение задачи оптимизации формы простых калибров, относящейся к теории оптимального управления. Искомый контур калибра представляется как траектория движения точки, описываемого системой дифференциальных уравнений. Фазовые переменные определяют положение точки в пространстве, а управляющее воздействие – форму искомой кривой. Модель формоизменения металла при прокатке в калибрах являет собой условия трансверсальности, а предложенный функционал – критерий оптимизации.*

*Ключевые слова: вытяжные калибры, оптимизация, сортопрокатное производство, эффективность калибровки.*

### 1. Введение

Основным элементом технологии производства сортового проката является калибровка валков, от правильности разработки которой зависят технико-экономические и качественные показатели процесса прокатки. При этом нет четких критериев правильности калибровки того или иного профиля, более того существует бесконечное множество вариантов калибровки, которые обеспечивают получение требуемого профиля проката из заданной заготовки. Таким образом, возникает задача выбора наилучшего варианта калибровки по тем или иным критериям.

В качестве критериев оптимизации могут выступать минимум энергозатрат, максимальный коэффициент эффективности калибровки, минимальный износ валков или другие показатели. Строгая математическая постановка и ре-

шение подобных задач оптимизации в прошлом не представлялись возможными из-за отсутствия научно обоснованных методов расчета калибровки валков. В большинстве своем работа калибровщика базировалась на практическом опыте, а не на формализованных методиках. В настоящее время благодаря многим научным исследованиям подобная ситуация начинает меняться [1, 2]. Имеющийся разрыв между теорией обработки металлов давлением и комплексом знаний по разработке калибровки постепенно сокращается, что в будущем, несомненно, должно привести к созданию достаточно стройной теории калибровки прокатных валков.

Многолетний опыт работы автора данной статьи в области разработки математических моделей процессов сортовой прокатки позволил поставить ряд задач оптимизации калибровки простых сортовых профилей, одна из которых и представлена далее.

## **2. Постановка задачи оптимизации**

В большинстве своем калибровка простых сортовых профилей представляет собой систему вытяжных калибров, т.е. последовательность из чередующихся равноосных и неравноосных калибров, позволяющих из исходной заготовки получать требуемый профиль. При этом форма и размеры промежуточных равноосных калибров во многом могут быть обусловлены сортаментом стана, так как профили различных размеров выпускаются из разных клетей, а неравноосные калибры могут выбираться более свободно. Например, в сочетании с круглыми калибрами можно использовать овальные, оформленные различными радиусами, плоские или многорадиусные овалы или даже гладкую бочку.

Исходя из сказанного, рассмотрим прокатку в двух клетях. При этом зададим равноосные сечения на входе в первую клеть и на выходе из второй. В первой клетке мы можем подобрать бесконечное многообразие неравноосных калибров, которые позволят из заданного входящего сечения получать требуе-

мый профиль на выходе из второй клетки. Таким образом, имеется множество калибровок, дающих на выходе один и тот же профиль, но отличающихся по прочим характеристикам, т.е. возникает задача оптимизации формы и размеров неравноосного калибра.

В качестве критерия оптимизации выберем, например, максимум коэффициента эффективности калибровки [3]. Данное понятие относится к вытяжным калибрам и характеризует их вытяжную способность. При прочих равных условиях различные калибры позволяют получать различные коэффициенты вытяжки. Те калибры, которые обеспечивают больший коэффициент вытяжки, отличаются большей эффективностью.

Коэффициент эффективности будем определять по формуле:

$$K_{\varepsilon} = V_l / V_h, \quad (1)$$

где  $V_l$  и  $V_h$  – смещенный объем металла в продольном направлении (в направлении вытяжки) и по высоте (в направлении обжатия).

Так как в паре калибров общая вытяжка задана, то максимальная эффективность будет обеспечена в том случае, если сумма смещенных объемов металла по высоте в первой и второй клетях будет минимальной.

Контур калибра первой клетки можно рассматривать как неизвестную функцию, а смещенный объем металла по высоте в качестве функционала. Т. е. наша задача оптимизации должна относиться к области вариационного исчисления, однако не всякая функция может быть использована в качестве контура калибра, например, ломаная линия (рис. 1), по понятным причинам не может рассматриваться в качестве решения.

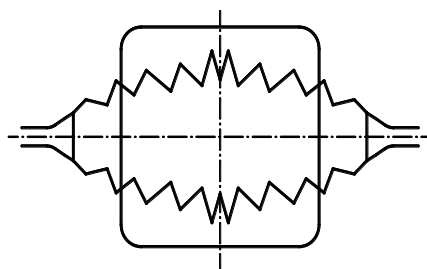
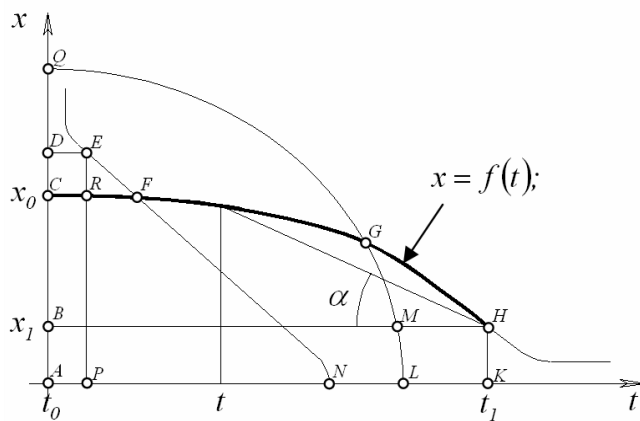


Рис. 1. К вопросу ограничений на форму калибров

Это означает, что необходимо ввести ограничения на вид искомого контура (искомой кривой), что переводит задачу из области классического вариационного исчисления в область теории оптимального управления.

Сформулируем задачу оптимального управления (ЗОУ).

Известно, что теория оптимального управления изучает управляемые объекты и ищет наилучшие способы управления ими [4]. Исходя из этого будем условно рассматривать искомый контур калибра, описываемый функцией  $x = f(t)$ , как траекторию движения некоторого абстрактного объекта с началом в точке  $(x_0, t_0)$  и концом в точке  $(x_1, t_1)$  (рис. 2).



$$\begin{aligned} S_0 &= AQL; S_1 = ACHK; \\ S_6 &= ADEN; S_2 = ACGL; \\ S_3 &= ACFN; S_4 = ABHK; \\ S_5 &= ABML; S_7 = ADEP; \\ S_8 &= ACRP; \quad \varphi = \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned}$$

Рис.2. К ЗОУ с подвижными концами

Математическую модель движения данного объекта представим в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = u, \\ \frac{dx}{dt} = u(t_1 - t) - \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x$  и  $\varphi$  – фазовые переменные, а  $u$  – управляющее воздействие.

В качестве критерия оптимальности, как уже оговаривалось, возьмем минимум смещенного объема металла по высоте

$$J = \ln \frac{S_0}{S_2} + \ln \frac{S_1}{S_3} \rightarrow \inf. \quad (3)$$

Введем дополнительные ограничения на вид искомой кривой. Логично потребовать, чтобы функция  $x = f(t)$  на интервале  $(t_0, t_1)$  была выпуклой и убывающей. Выпуск в калибре не должен быть меньше определенной, заранее заданной величины, а значение  $x_1$  должно позволить построить калибр первой клетки без установки валков в забой и с определенным запасом на уширение. В математической записи данные утверждения будут выглядеть следующим образом:

$$0 \leq u \leq \frac{\varphi}{t_1 - t}, \quad \varphi \leq \beta, \quad x_1 \geq b, \quad (4)$$

где  $\beta$  и  $b$  – заданные постоянные величины.

Также в качестве дополнительных ограничений мы должны записать уравнения, которые будут определять уширение в первой и второй клетях. Большинство из известных методик для расчета уширения на данную роль не подходят в силу того, что они разработаны для определенных систем калибров, а в рассматриваемом случае система калибров неизвестна. Необходимо универсальное уравнение, которое подойдет для любых калибров простой формы. Подобное уравнение было разработано в работе [5]. Используя это уравнение, можно представить условия трансверсальности для рассматриваемой задачи:

$$\begin{cases} \ln \frac{S_0}{S_1} = K_{FN} \frac{S_1}{S_4} \ln \frac{S_4}{S_5}, \\ \ln \frac{S_1}{S_6} = K_{FR} \frac{S_6}{S_7} \ln \frac{S_7}{S_8}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $K_{FN}$  и  $K_{FR}$  – коэффициенты, учитывающие форму очага деформации.

Таким образом, ЗОУ можно записать так. Дана математическая модель объекта (I-IV).



$$(I) \quad \begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = u, \\ \frac{dx}{dt} = u(t_1 - t) - \varphi; \end{cases}$$

$$(II) \quad J = \ln \frac{S_0}{S_2} + \ln \frac{S_1}{S_3} \rightarrow \inf;$$

$$(III) \quad 0 \leq u \leq \frac{\varphi}{t_1 - t}, \quad \varphi \leq \beta, \quad x_1 \geq b, \quad t \in [t_0, t_1];$$

$$(IV) \quad \begin{cases} \ln \frac{S_0}{S_1} = K_{FN} \frac{S_1}{S_4} \ln \frac{S_4}{S_5}, \\ \ln \frac{S_1}{S_6} = K_{FR} \frac{S_6}{S_7} \ln \frac{S_7}{S_8}. \end{cases}$$

Найти управление  $u(t)$ , которое удовлетворяет условию (III) и переводит систему (I) из начального состояния  $(x_0, t_0)$  в конечное  $(x_1, t_1)$  и минимизирует функционал  $J$  и соответствующую этому управлению траекторию  $x(t)$ , которая удовлетворяет условию (IV).

Аналитическое решение данной задачи не представляется возможным по ряду причин (сложный вид функционала, не обладающего свойством локальности; непостоянство области допустимых управляющих воздействий; наличие ограничений на фазовые переменные; рекуррентность условий трансверсальности), однако вполне возможно численное решение.

### 3. Численное решение ЗОУ

В силу того, что аналитическое решение задачи оптимизации невозможно, был разработан алгоритм численного решения, суть которого заключалась в разбиении искомой кривой на прямолинейные участки, координаты концов которых являются варьируемыми параметрами. Так как изначально нам не было

известно какое количество глобальных и локальных решений имеет задача и состоит ли пространство допустимых решений из одной или множества непересекающихся областей, поэтому воспользовались методом полного перебора всех возможных вариантов решения с предварительным исключением явно недопустимых вариантов. Плоскость  $(x, t)$  была представлена в виде сетки с определенными шагами по осям. Шаги и точность выполнения всех ограничений выбирали из практически необходимой точности расчета геометрических размеров калибра. Наибольшее влияние на время расчета оказывает величина шага сетки, который выбирали около 1% от ширины раската. При такой величине шага время расчета оптимального калибра составляло около суток. Дальнейшее уменьшение шага приводило к существенному замедлению работы алгоритма, который, надо признать, еще недостаточно совершенен и имеет значительные резервы для увеличения скорости работы.

Численное решение ЗОУ проводили для первых десяти клеток стана 370 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Предварительные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Оптимальный неравноосный калибр всегда имеет плоское дно, по крайней мере, кривизна дна не улавливается при выбранной точности расчетов. Боковая стенка калибра представлена кусочной кривой, состоящей как минимум из двух линий второго (в простейшем случае) или более высоких порядков (рис. 3). Эта форма характерна для всех пяти рассчитанных калибров, пропорции и размеры в каждом случае, естественно, отличаются.

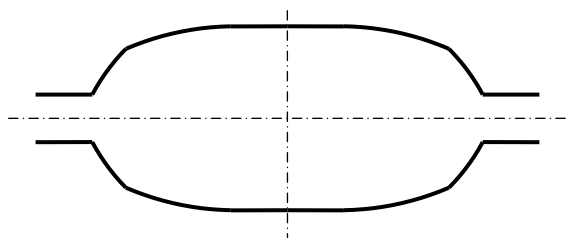


Рис. 3. Пример оптимальной формы неравноосного калибра

Коэффициент эффективности новой калибровки на 10% выше, чем для действующей на стане калибровки круг-овал. Работа деформации также снизи-

лась примерно на 10%, а распределение нагрузки по клетям стало более равномерным. Уменьшилось отношение ширины раската к его высоте для неравноосных сечений, что привело к более равномерному распределению обжатия по ширине раската, и, как следствие, более равномерный износ валков.

Из сказанного можно заключить, что профили, входящие в сортамент стана 370 ОАО «ММК», можно прокатать в 16 клетях вместо 18 без увеличения нагрузки на оборудование.

#### **4. Заключение**

Следует отметить, что кроме приведенной задачи можно поставить и более сложные, в которых искомыми будут геометрические параметры всех калибров прокатного стана для прокатки определенного профиля или даже определенного сортамента.

При таком подходе можно рассматривать калибровку валков не как конструктивную разработку, полученную в основном из практического опыта, а как нетиповое и оригинальное решение четко сформулированной математической задачи, что позволит максимально использовать возможности оборудования стана и минимизировать производственные издержки.

#### **Библиографический список**

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
2. Тулупов О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 224 с.
3. Эффективность деформации сортовых профилей / Тулупов С.А., Гун Г.С., Онискив В.Д., Курдюмова В.А., Радюкевич К.Л. М.: Металлургия, 1990. 280 с.

4. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. М.: Наука, 1983. 392 с.

5. Кинзин Д.И. Совершенствование и проектирование калибровок простых сортовых профилей на основе анализа показателей формоизменения и энергосиловых параметров: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. 107 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ВАЛКОВ  
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ ПРОСТОЙ ФОРМЫ**

*Проведено моделирование износа калибра чистовой клетки при производстве круглого проката диаметром 23 мм в программном комплексе DEFORM. Введение коэффициента тоннажа в модель износа Аркхарда позволило выявить динамику износа в процессе прокатки 300 тонн металла, с разбиением на пять проходов моделирования. Качественно и количественно полученные результаты согласуются с характером износа рассмотренного калибра в процессе эксплуатации на стане 370 ОАО «ММК». Проведено качественное сравнение влияния различных геометрических соотношений в неравноосном калибре на износ валков в системе шестиугольник-квадрат. Использование более узких и высоких неравноосных калибров повышает равномерность износа и стойкость чистового калибра.*

*Ключевые слова: сортовая прокатка, метод конечных элементов, износ валков, калибр.*

При поставке оборудования сортовых станов машиностроительные компании передают клиенту калибровки валков для производства предполагаемого профильного сортамента, разработанные собственными калибровочными бюро. Однако данные калибровки далеко не всегда обладают такими свойствами, как универсальность, экономичность и гибкость, так как главная задача машиностроителей – обеспечить клиента оборудованием для стабильного выпуска продукции, при этом максимально сократив сроки ввода в строй.

Именно поэтому калибровочные бюро сортовых производств занимаются не только разработкой калибровок при освоении новых видов продукции, но и корректировками контрактных калибровок с целью снижения затрат энергии, повышения стойкости оборудования и оптимизации валкового хозяйства.

Внесение любых изменений в геометрию калибров может привести к неоднозначным результатам, когда улучшение одного показателя приводит к ухудшению других. Именно поэтому особо актуальна возможность провести моделирование методом конечных элементов без необходимости затрачивать средства на опытные прокатки с использованием экспериментальной калибровки, которые в условиях реального производства провести практически невозможно.

Целью данной работы является моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы.

Поставлены следующие задачи:

- учёт ограничений программы DEFORM;
- выбор модели расчёта износа и её коэффициентов;
- учёт изменения формы калибра в процессе износа;
- проверка адекватности моделирования на основе экспериментальных данных;
- моделирование износа валков в системе калибров шестиугольник-квадрат с различными геометрическими соотношениями в неравноосном калибре.

## **1. Условия моделирования**

Процесс: симметричный (использование четвертой части поперечного сечения заготовки и валков); установившийся (произвольное Лагранж-Эйлерово поведение элементов ALE); неизотермический (расчёт температурного профиля заготовки и валков).

Конечные элементы – гексаэдры. Выбор количества и типа элементов был обоснован ранее [1].

Заготовка: температура перед клетью  $1000^{\circ}\text{C}$ ; 200 элементов в поперечном сечении; 72 слоя в продольном сечении; более плотное размещение элементов в окрестности очага деформации с коэффициентом отношения 6:1; длина 280 мм (7 длин геометрического очага деформации); показатель трения – 0,52; материал – сталь AISI 1015 (сталь 15).

Валки: абсолютно жёсткие, несжимаемые; 100 элементов в продольном сечении; 90 слоёв в радиальном направлении; температура  $50^{\circ}\text{C}$ ; твёрдость по Роквеллу 50 HRC, по сечению постоянная, от изменения температуры не зависит; скорость вращения 508,7 об/мин.

В поперечном сечении вала всего 100 элементов, несмотря на то, что площадь сечения значительно превышает таковую у заготовки. Это было сделано сознательно. Мы проводим моделирование износа, следовательно, интерес представляет только приконтактная зона вала. Поэтому конечные элементы сконцентрированы в ней (рис. 1).

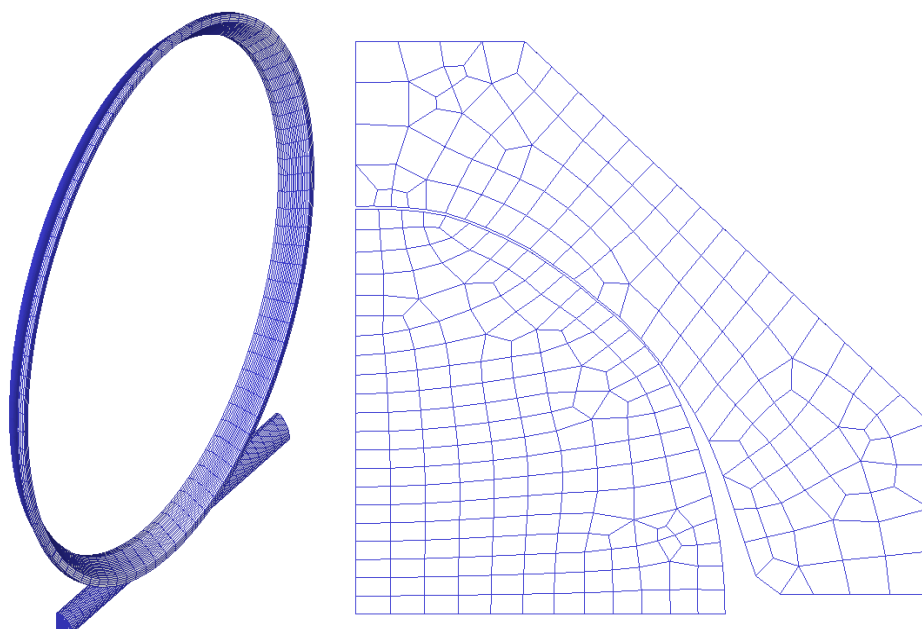


Рис. 1. Упрощённое представление заготовки и вала в среде DEFORM в объёме (слева) и плоскости поперечного сечения (справа)

В DEFORM для расчёта износа реализована модель Аркхарда для тех способов обработки давлением, в которых преобладает абразивный износ [2].

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt, \quad (1)$$

где:  $p$  — контактное напряжение;  
 $v$  — скорость скольжения;  
 $H$  — твёрдость материала инструмента;  
 $t$  — продолжительность контакта;  
 $a, b, c, K$  — коэффициенты;  
 $a = 1; b = 1; c = 2$ .

Формула учитывает влияние контактных напряжений, скорости скольжения металла об инструмент, твёрдости инструмента, продолжительности взаимодействия заготовки и инструмента.

Значения коэффициентов  $a, b, c$  выбрали на основе рекомендаций руководства пользователя DEFORM и Воронцова [3]. Выбор величины коэффициента  $K$  описан в следующем разделе.

## 2. Моделирование износа вала при производстве

### круглого проката диаметром 23 мм на стане 370 ОАО «ММК»

Для проверки адекватности моделирования воспользовались данными замеров износа, полученными инженерами лаборатории прокатных валков ОАО «ММК» в производственных условиях [4], в отличие от данных Ли [5], собранных на лабораторных установках.

Недостатки лабораторного метода: невозможность учёта циклического изменения температуры поверхности инструмента и наличия зоны прилипания (трения качения) наряду с зоной скольжения, приработанность поверхностей инструмента и заготовки после начального периода испытаний. В то же время обработка данных со стана учитывает эти факторы, хотя динамику изменения



формы калибра в процессе работы отследить невозможно, так как из-за производственных ограничений замеры проводили на изношенных валках, готовых к переточке.

На рис. 2 представлены конструктивные размеры чистового калибра и износ валков, произведённых ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» (МЗПВ) и фирмой «Akers». Осевой износ валков МЗПВ после прокатки на них 308 тонн составил 0,6 мм.

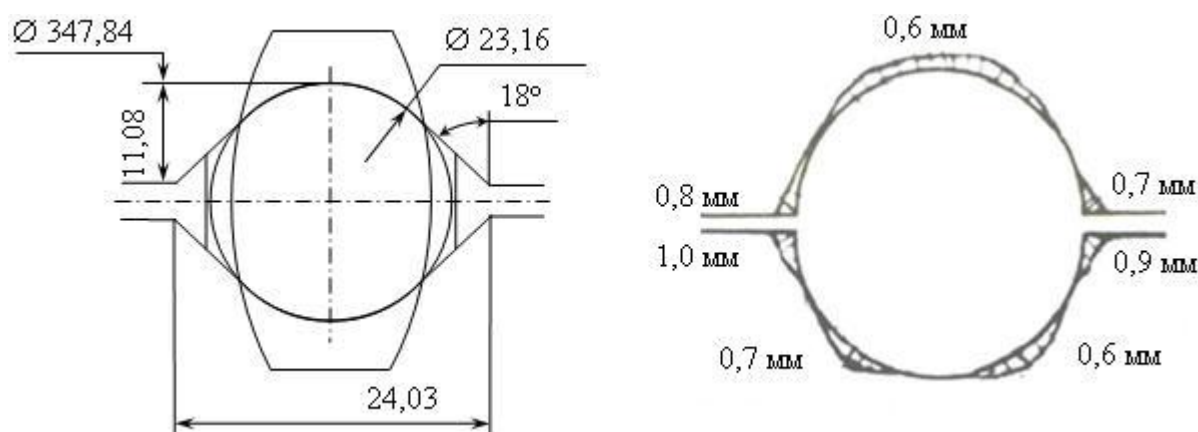


Рис. 2. Основные размеры и износ валков ЗАО «МЗПВ» (верхний ручей) и «Akers» (нижний ручей) при прокатке круглого проката диаметром 23 мм в клетки №16 стана 370 ОАО «ММК» после 308 и 282 тонн соответственно

Твёрдость валка СШХНМ-64И(Ц) – валка сортового с шаровидной формой графита, легированного хромом, никелем и молибденом, со структурой рабочего слоя «индефинит», отлитого центробежным способом на МЗПВ и минимальной твёрдостью по Шору 64 HSd – находится в диапазоне 45-53 HRC. По условиям моделирования твёрдость валка оставалась постоянной. В действительности же скорость износа может повыситься от разогрева валка в процессе деформации заготовки, что приведёт к падению твёрдости. В случае сильного вреза калибра в валки его твёрдость в различных точках также значительно варьируется, причём бурты и выпуск будут более износостойкими, чем дно калибра. Новый валок будет иметь более высокую твёрдость по сравнению с максимально переточенным валком, так как к центру валка твёрдость металла падает из-за ограниченной глубины рабочего слоя. Переточенный валок в про-

цессе эксплуатации длительное время подвергается воздействию высоких температур, что также негативно сказывается на твёрдости и равномерности её распределения по контуру калибра. Все эти факторы невозможно учесть в рамках моделирования без значительного увеличения количества расчётов и проведения натурных экспериментов.

Для выбора значения коэффициента  $K$  в уравнении (1) необходимо вычислить интенсивность износа в точке вала за один его контакт с металлом.

На стане 370 используется заготовка сечением 150x150 мм длиной 11,7 м, а площадь поперечного сечения предчистового овала составляет 484 мм<sup>2</sup>. Отсюда, длина раската на входе в чистовую клеть

$$L_{15} = LS / S_{15} = 11,7 \cdot 150^2 / 484 = 544 \text{ м}, \quad (2)$$

где:  $L$  – длина заготовки, м;

$S$  – площадь поперечного сечения заготовки, мм<sup>2</sup>;

$S_{15}$  – площадь поперечного сечения овала, мм<sup>2</sup>;

Длина дуги контакта

$$C_{\text{конт}} = \pi D = 3,14 \cdot 0,352 = 1,106 \text{ м}, \quad (3)$$

где  $D$  – катающий диаметр, м.

В процессе прокатки одной заготовки происходит следующее число контактов точки вала с металлом:

$$N_K = L_{15} / C_{\text{конт}} = 544 / 1,106 = 491,86. \quad (4)$$

При прокатке 308 тонн металла количество контактов составит

$$N_{308} = N_K P_{308} / P = 491,86 \cdot 308 / 2,05 = 73899, \quad (5)$$

где:  $P$  – масса заготовки;

$P_{308}$  – масса прокатанного металла до достижения осевого износа в 0,6 мм.

Интенсивности износа при прокатке овального раската в круглом калибре

$$W = W_{308} / N_{308} = 6 \cdot 10^{-4} / 73899 = 8,12 \text{ нм}, \quad (6)$$

где  $W_{308}$  – фактический износ калибра после прокатки 308 тонн металла, м.

Значение  $K$  подбирается механически, чтобы в процессе моделирования в DEFORM получать рассчитанную величину интенсивности износа  $W$  по оси калибра равную 8,12 нм. Таким образом,  $K = 1,185 \cdot 10^{-4}$ .

Однако технические возможности существующих на рынке программных комплексов для моделирования процессов ОМД на основе метода конечных элементов не позволяют провести проверку адекватности расчёта износа для 74 тысяч контактов металла с валком, в котором за один контакт высота калибра будет увеличиваться всего на несколько нанометров. Поэтому мы ввели «коэффициент тоннажа»  $K_T$ , который позволит нам провести достаточно малое число прокаток, сэкономить время, снизить объём вычислений, но при этом увидеть динамику износа калибра.

Допустим стойкость круглого калибра 300 тонн, а количество проходов при моделировании равно пяти. Следовательно, один проход равносителен прокатке 60 тонн в реальных условиях. Тогда коэффициент тоннажа

$$K_T = \frac{C L S K}{N P S_{15} \pi D} = \frac{300 \cdot 11,7 \cdot 150^2 \cdot 1,185 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 2,05 \cdot 484 \cdot 3,14 \cdot 0,352} = 1,705, \quad (7)$$

где:  $C$  – стойкость калибра, т;

$N$  – число проходов моделирования.

Получаемое значение  $K_T$  подставляется в формулу (1) вместо  $K$ , который используется как константа в формуле выбора величины  $K_T$  при моделировании прокатки в других клетях стана.

Таким образом, были получены данные о характере износа (рис. 3 и 4.)

Форма калибра после моделирования качественно совпадает с данными со стана 370 (рис. 2). По контуру калибра максимальный износ приходится на участок с наибольшим обжатием металла. При оценке овальности готового проката именно в этом месте диаметр будет наибольшим.

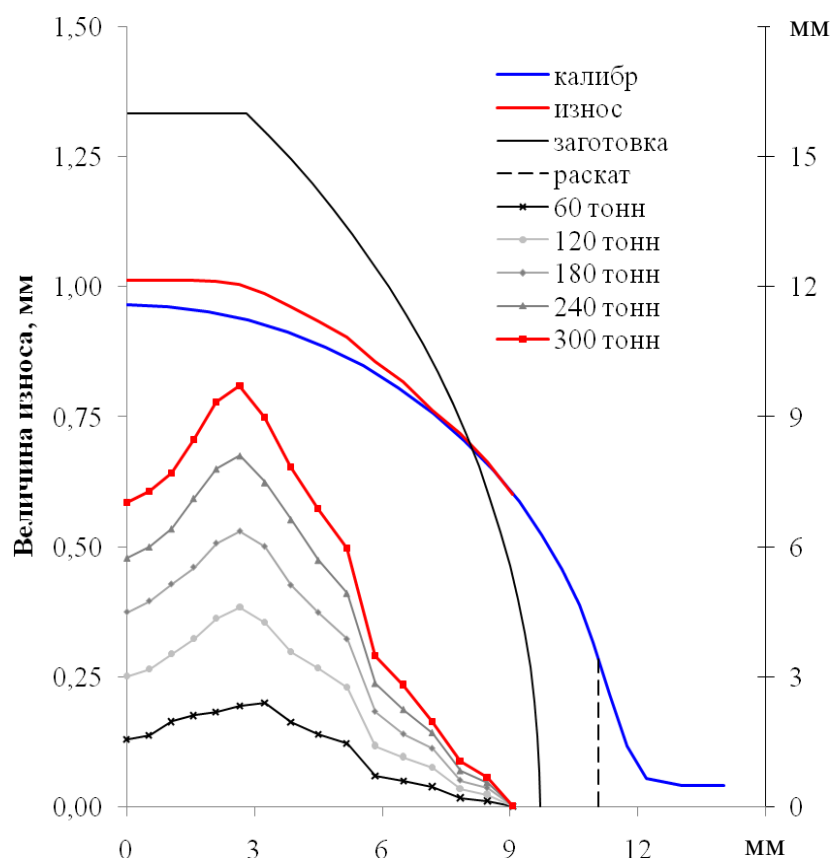


Рис. 3. Результаты моделирования износа калибра при прокатке 300 тонн круглого проката диаметром 23 мм на стане 370 ОАО «ММК»

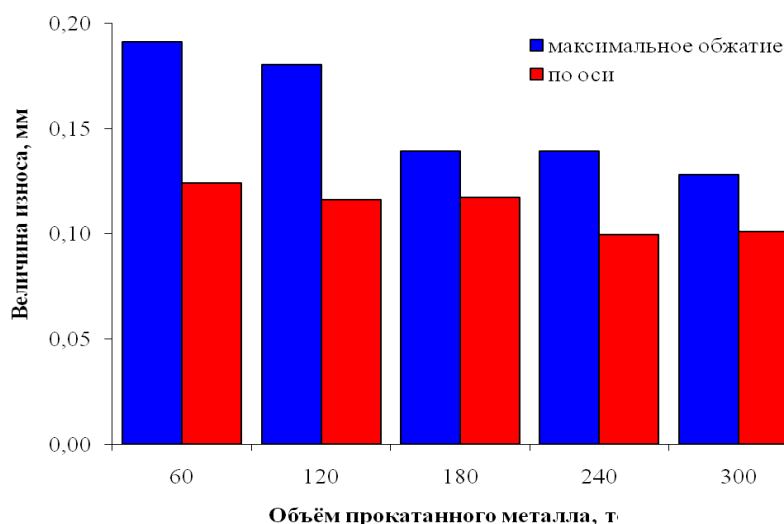


Рис. 4. Влияние объема прокатанного металла на интенсивность износа по оси калибра и в месте максимального обжатия

В черновых калибрах такое изменение формы сечения заготовки может привести к образованию заката при прокатке в следующем равноосном калибре, так как высота калибра по оси с увеличением прокатанного тоннажа стано-

вится меньше высоты калибра по месту максимального обжатия (линия «износ» на рис. 3). Чётко видно образование угла у изношенного калибра, т.е. стремление круглого калибра обрести форму ящичного, повысив сродство входящего и выходящего сечений раската.

Отсутствие износа по выпуску калибра обусловлено ограничениями, наложенными при моделировании: наличие плоскостей симметрии заготовки, установившийся ALE процесс, отсутствие подпора (натяжения) от предчистовой клетки и отсутствие проводок на входе в клеть и на выходе из неё, отсутствие биения полосы в процессе прокатки.

Если сравнивать величину износа за каждые 60 тонн (рис. 4), можно отметить следующее: по оси калибра износ вала практически не меняет своей интенсивности, а в местах максимального обжатия она становится значительно меньше. Это объясняется снижением величины напряжений и продолжительности контакта из-за уменьшения обжатия и длины дуги контакта. Уменьшение длины дуги контакта по месту с максимальным обжатием происходит более интенсивно, так как начальный диаметр вала в данной зоне был больше, и убывает он более значительно, следовательно, быстрее сокращается длина дуги контакта и интенсивность износа.

### **3. Моделирование износа валков**

#### **в системе калибров шестиугольник-квадрат**

Интерес вызывает не только возможность моделирования износа в одном калибре, но и как влияют различные геометрические соотношения неравноосного калибра на износ в системе калибров «неравноосное-равноосное сечение». В данной работе мы рассмотрим одну из таких систем – шестиугольник-квадрат (рис. 5, табл. 1).

По сравнению с моделированием износа калибра при производстве круглого проката диаметром 23 мм условия изменились следующим образом: скорость вращения валков первой клетки 60 об/мин, второй – 87 об/мин; длина заго-

товки 350 мм; для 15 тыс. контактов металла и валков выбрали  $K_T = 1,185 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 10^4 = 1,778$ ; моделирование одного прохода в каждой из клеток.

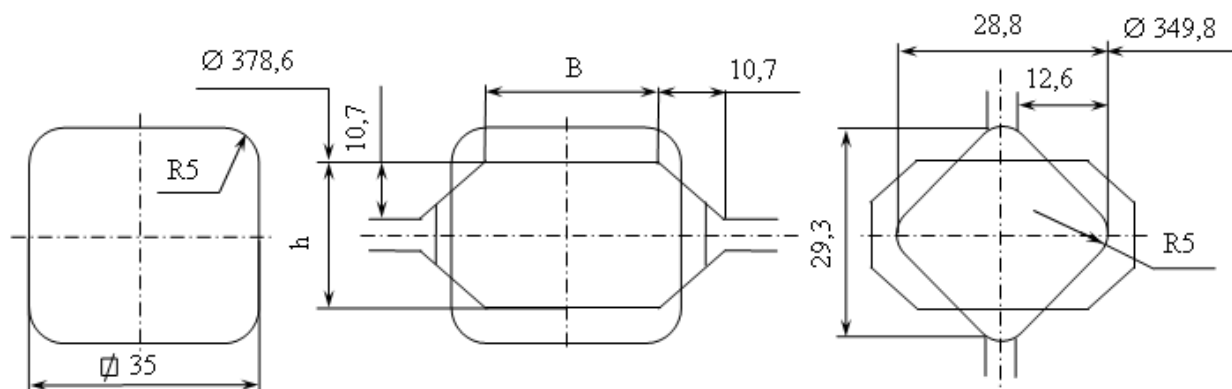


Рис. 5. Размеры заготовки и калибров

Таблица 1

Размеры неравноосных калибров, мм

Ширина калибра		Высота калибра	Зазор
по дну (В)	по врезу		
25,00	46,40	23,15	1,75
27,50	48,90	22,75	1,35
30,00	51,40	22,20	0,80
32,50	53,90	21,90	0,50
35,00	56,40	21,43	0,03

В одном из ранних исследований мы работали с этой системой калибров при оценке влияния форм различных неравноосных калибров на суммарный коэффициент эффективности, общую работу деформации и величину степени использования запаса пластичности на выходе из чистовой клетки. Неравноосный калибр с минимальной шириной по дну и максимальной высотой калибра обеспечил лучший результат по всем перечисленным показателям [6]. Поэтому мы ожидали получение схожих результатов при моделировании износа валков.

На рис. 6 представлены результаты моделирования износа для систем калибров шестиугольник-квадрат, в которых неравноосные шестиугольники имели ширину по дну 25, 30 и 35 мм соответственно.

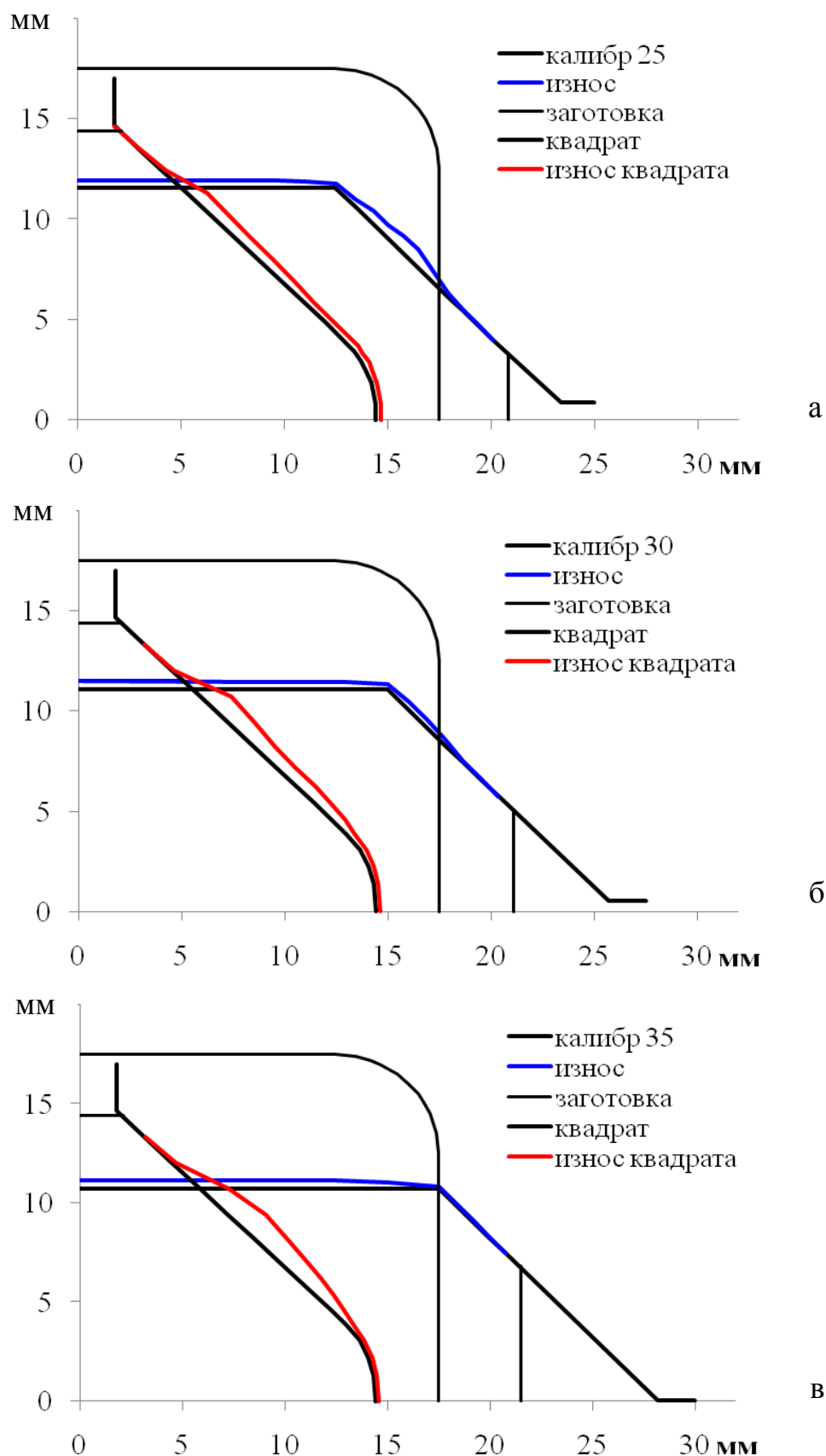


Рис. 6. Износ шестиугольных и квадратных калибров при использовании шестиугольного калибра шириной по дну 25 (а), 30 (б) и 35 мм (в)

Неравноосные калибры. Максимальный износ калибра с шириной по дну 25 мм приходится на выпуск (рис. 6а), а у калибров с шириной по дну 30 и 35 мм – на вертикальную ось калибра (рис. 6б и 6в). Более стеснённые условия деформации, бóльшая скорость износа, а в итоге и бóльшая величина переточки валка с узким шестиугольником приведут к сокращению срока службы валка.

Равноосные калибры. Форма раската после прокатки в широком шестиугольном калибре (ширина по дну 35 мм) приводит к увеличению разницы в уровне обжатия металла при движении от вертикальной оси к разъёму калибра. Абсолютное обжатие и длина дуги контакта по вертикальной оси калибра соответственно в 1,6 и 1,3 раза меньше, чем по месту максимального обжатия. Всё это ведёт к большей длительности контакта и высоким значениям интенсивности напряжений в плоскости максимального обжатия, которые ускоряют износ.

С другой стороны, узкий неравноосный калибр снижает неравномерность деформации раската в квадратном калибре. Длина дуги контакта и обжатие в разных точках калибра изменяются менее чем на 3%. В связи с этим форма калибра после 15 тыс. контактов совсем незначительно отклонилась от изначальной. Такой равномерный износ легко компенсировать уменьшением зазора между валками. В случаях на рис. 6б и 6в искажение формы получаемого раската неустранимо и необходим переход на новый чистовой калибр.

В целом, можно отметить, что в представленной системе шестиугольник-квадрат повышение стойкости квадратного калибра ведёт к падению стойкости шестиугольного и наоборот (рис. 7).

Однако стойкость равноосного калибра является более значимой, так как именно из него выпускаются сортовые профили простой формы. К тому же на сортовых станах стойкость неравноосных калибров в любой группе клеток всегда выше, поэтому можно ей пожертвовать ради увеличения срока службы валков с равноосными калибрами.



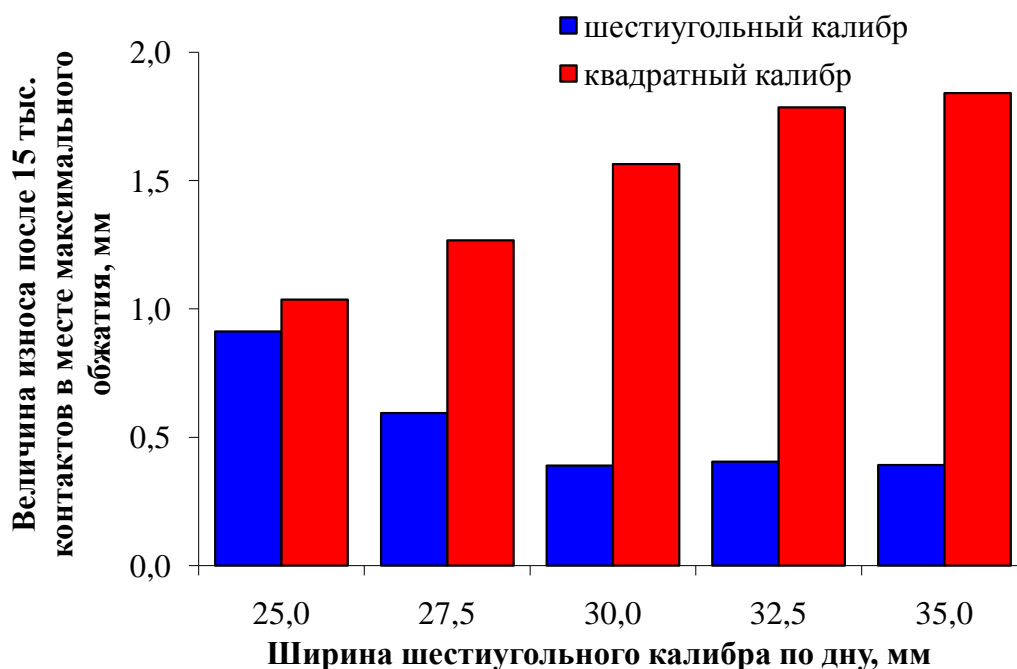


Рис. 7. Влияние ширины шестиугольного калибра на износ в обоих проходах

#### 4. Заключение

Для адекватной оценки износа валков при прокатке сортовых профилей простой формы в программном комплексе DEFORM провели подготовительную работу для выбора значений коэффициента  $K$  в модели Аркхарда и ввели поправочный коэффициент тоннажа  $K_T$  для ускорения расчётов и выявления динамики изменения формы калибра. Это позволило смоделировать прокатку 300 тонн металла за пять проходов и получить результаты, которые согласуются с данными, полученными на стане 370 ОАО «ММК» как по значениям осевого износа, так и по характеру изменения формы калибра.

Полученное значение  $K$  можно считать базовым для расчёта  $K_T$  в других клетях стана при условии, что в них используются валки аналогичной твёрдости.

Моделирование износа в шестиугольных калибрах подтвердило наше предположение о преимуществах использования узких и высоких калибров, обеспечивающих более высокую стойкость чистового калибра наряду с боль-

шей эффективностью, меньшими энергозатратами и меньшими значениями степени использования запаса пластичности системы калибров шестиугольник-квадрат.

Следующим этапом работы станет оценка калибровки, используемой на стане 370 ОАО «ММК» с точки зрения износостойкости валков, и внесение изменений в калибровку для улучшения существующей ситуации.

### **Библиографический список**

1. Рычков С.С. О выборе формы и размеров конечных элементов при моделировании процессов сортовой прокатки // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 37. С. 146-151.
2. DEFORM 3D Version 10.0 User's manual. Columbus, Ohio, USA, 2009.
3. Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов / Н.М. Воронцов, В.Т. Жадан, Б.Я. Шнееров, и др. Металлургия, 1973, 288 с.
4. Опыт эксплуатации валков ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» на сортопрокатных станах ОАО «ММК». И.В. Боровков, О.В. Пальчиков, С.Я. Унру, Т.Н. Зубков, Т.А. Мурзабаев, Р.В. Новицкий. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: сб. науч. тр. / Центральная лаборатория ОАО «ММК». Вып. 14. Магнитогорск, 2009. С. 254-260.
5. Lee Y. Rod and bar rolling. Theory and applications. Marcel Dekker, Inc., New York, 2004. 465 p.
6. Кинзин Д.И., Рычков С.С. Исследование эффективности калибровки сортовых профилей с помощью программы DEFORM-3D // Труды международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2010». М.: РУДН, 2010. С. 133-136.

## **КАЛИБРОВКА ДЛЯ МИКРОСТАНА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ**

В докладах конференции «Арматурный и фасонный прокат: новая конфигурация российского рынка», проводимой 4-5 апреля 2013 года в Москве журналом «Металлоснабжение и сбыт», отмечалось, что в 2012 году в РФ было произведено 7920 тыс. т арматурной стали для строительства. При этом импорт составил 1432 тыс. т. К 2015 году производство вырастет до 10 млн т, но дефицит сохранится [1, 2].

Особое место в крупнопанельном строительстве уделяется арматуре в бунтах, дефицит которой продолжает увеличиваться. Как было показано авторами [3], в крупнопанельном строительстве предпочтительным является применение бунтовой арматуры, поскольку при её раскroe практически нет технологических остатков. Использование стержневой арматуры предполагает технологические потери при раскroe 20-30%.

С целью восполнения дефицита был выполнен проект микрозавода (рис. 1) для производства бунтового арматурного проката по ГОСТ Р 52544-2006 в объёме 15-30 тыс. т в год.

Технологическая схема предусматривает размотку бунтов катанки диаметром 8-16 мм из стали 3сп. Далее бунт разматывается и после подогрева в индукторе до 1050°C деформируется на меньший диаметр по схеме овал-круг с нанесением профиля в чистовом калибре. Арматура сматывается в бунт намотке Гаррета или режется на мерные длины с остыванием на холодильнике. Возможно производство горячекатаной арматуры класса A400C, а также термически упрочнённой класса A500C.

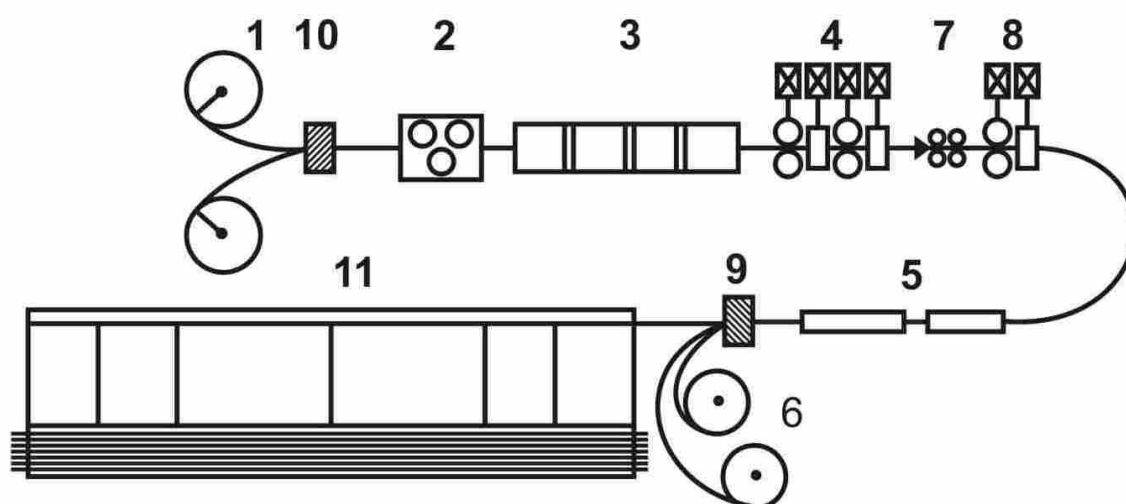


Рис. 1. Компоновка оборудования микрозавода:

1-разматыватель бунтов; 2-окалиноломатель; 3-индуктор; 4-блок клеток №1-4;  
5-линия термоупрочнения; 6-моталки Гаррета; 7-делительная кассета;  
8-блок клеток №5-6; 9-ножницы; 10-контактная сварка; 11-холодильник

При прокатке в одну нитку арматуру диаметром 6 мм прокатывали в три прохода из катанки 8 мм. Аналогично в три прохода получают и другие диаметры арматуры от 10 до 14 мм из подката диаметром 16 мм. Суммарный коэффициент вытяжки на отдельных диаметрах от 1,3 до 1,8. Первоначально было установлено три прокатных клетки. Прокатка профиля в одну нитку позволяла обеспечить годовое производство в пределах 13 тыс. т. Для увеличения объёма производства до 30 тыс. т было предложено увеличить количество клеток до 6 и использовать технологию слиттинга. Схема прокатки арматуры 8х2 (слиттинг) из подката диаметром 16 мм приведена на рис. 2.

Расчетные параметры калибров приведены в табл. 1. Все необходимые параметры для построения калибров рассчитывали по формулам из учебного пособия [4]. Приведенные диаметры и диаметры по дну калибра в проходах рассчитывали исходя из начального диаметра валков 280 мм в калибре 1Н и 190 мм в калибре 6Н.

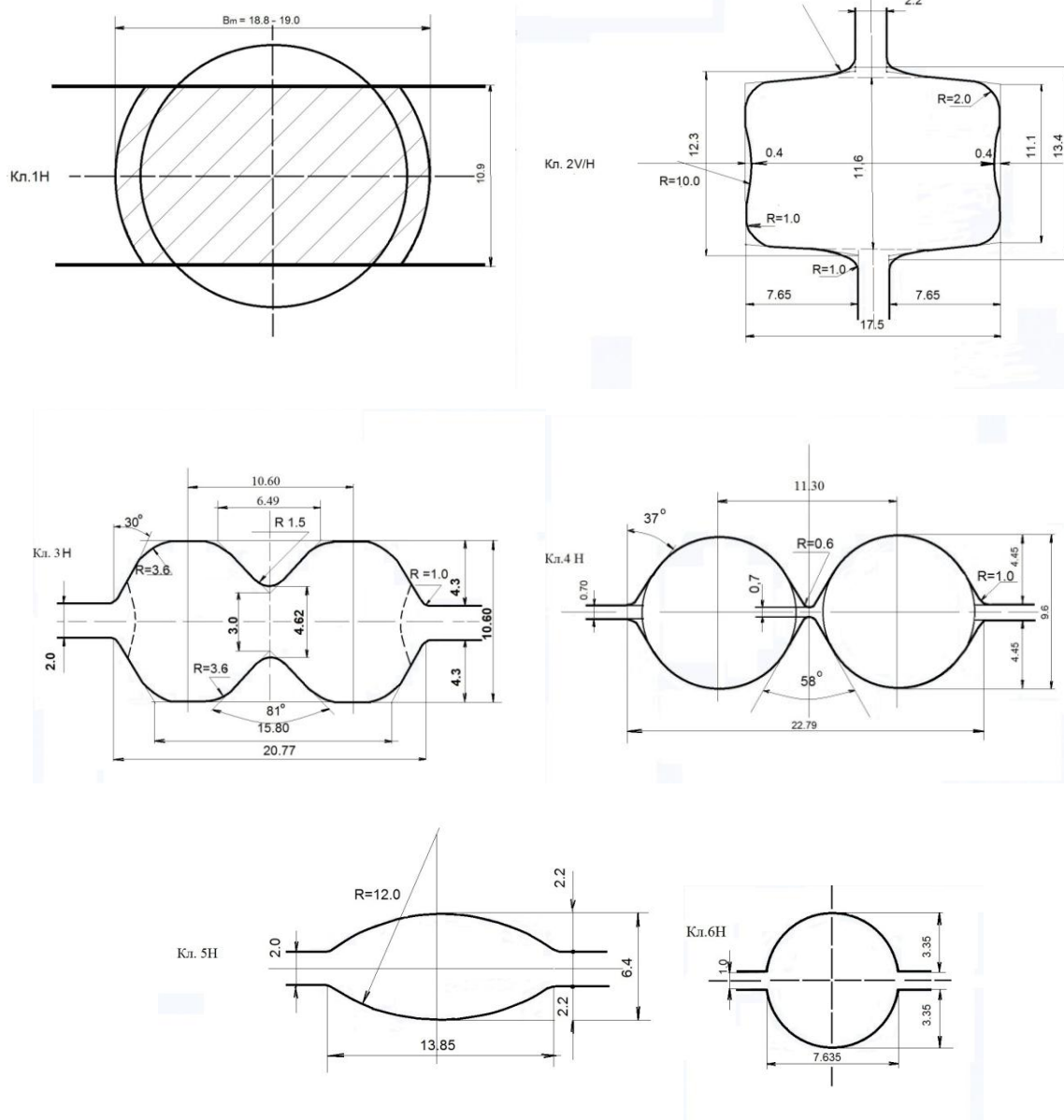


Рис. 2. Схема калибровки для прокатки арматуры №8  
из подката диаметром 16мм по схеме с разделением

В калибре 5Н возможно использование гладкой бочки, в зависимости от конструкции роликовой коробки на 6 клетки. В этом случае в клетки 5Н высота раската – 5,6 мм и ширина – 12,87 мм,  $\lambda = 1,104$ .

Данная схема прокатки с разделением позволила поднять производительность стана и обеспечить стабильный годовой объём готового проката 30 тыс. тонн за 6700 часов работы стана.

Таблица 1

## Значения параметров калибровки арматуры №8х2

Номер клетки	Параметры полосы			
	Н	В	F мм <sup>2</sup>	λ
	мм			
подкат	16,208	16,208	206,3	–
1Н	10,9	18,8	198	1,042
2V/Н	11,6	17,5	187	1,059
3Н	10,6	20,765	164,3	1,138
4Н	9,5	22,793	148,9	1,103
5Н	6,4	13,85x2	64,2x2	1,16
6Н	7,635	7,635	46,54	1,379

Кроме того была освоена технология накатки арматурного профиля диаметром 16 мм. Для этого использовали подкат 16 мм в плюсовом допуске, с массой погонного метра 1,67 кг, а готовый профиль №16 получали в минусовом допуске с массой погонного метра 1,4 кг. За счет этого обеспечивался средний коэффициент вытяжки  $\lambda = 1,18$ .

**Библиографический список**

1. Черненко Д.В. ММК для российских потребителей проката строительного назначения. Программа развития этого направления на ММК в среднесрочной перспективе: новые продукты, новые рынки сбыта. Доклады конференции «Арматурный и фасонный прокат: новая конфигурация российского рынка» 4-5.04. 2013 года, Москва.
2. Мадатян С.А. «Современное состояние производства и применения арматурной стали». Доклады конференции «Арматурный и фасонный прокат: новая конфигурация российского рынка» 4-5.04.2013 года, Москва.
3. Тихонов И.Н., Стеблов А.Б. Арматурный прокат для крупнопанельного домостроения // Жилищное строительство. 2011. №8. С.10-12.
4. Смирнов В. К., Шилов В. А., Инатович Ю. В. Калибровка прокатных валков: учебное пособие. М.: Металлургия, 1987. 368 с.

**ОПИСАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ**

Предлагается для моделирования процессов обработки металлов давлением способ описания формоизменения с совместным применением элементов теории матриц и фрактальной геометрии.

В общем случае процесс формоизменения можно представить произведением диагональной и столбчатой матриц:

$$[F]_i = [A_f]_i \times [F]_0. \quad (1)$$

При этом столбчатые матрицы описывают в векторном виде исходное и конечное состояние деформируемой среды. Среда может быть представлена как двумерным, так и трехмерным объектом, описанным конечным числом векторов в связанном виде в зависимости от требуемой точности представления формоизменения.

Описание контура среды в простейшем случае на плоскости представляется набором двух векторов, которые задаются как исходные элементы, определяющие характерные размеры поперечного сечения. В зависимости от точности или правильности представления контура задается дискретный алгоритм изменения набора элементов (векторов) столбчатых матриц по принципу «подобия», используемого во фрактальной геометрии.

По данному принципу можно описать контур среды любой известной формы, используемой, или применяемой при обработке металлов давлением. Необходимо лишь правильно задать алгоритм построения контура или попе-

речного сечения. Указанное правило позволяет строить разнообразные на вид сечения при малом количестве однотипных шагов.

Например, матрица исходного сечения (контура) может быть представлена и изменена в следующем виде:

$$[F]_0 = [L_1; L_2] = [L_1; L_2; L_3] = [L_1; L_2; L_3; L_4; L_5] = [L_1; \dots; L_i]. \quad (2)$$

Причем все элементы матрицы получаются только из исходных, первоначальных двух элементов, а сам закон «появления» остальных элементов задается дополнительно. Все указанные рассуждения можно применить и при описании контура среды не на двумерной плоскости, а в трехмерном пространстве.

Развивая представленный подход, нужно отметить, что вышеуказанным способом можно описывать не только контур деформируемой среды, но и саму структуру среды. При этом матрица формы будет разбиваться (делиться) на ряд меньших векторов, опять же по определенным правилам:

$$\{L\}_1 = \{L_{11}; L_{12}\} = \{L_{11}; L_{12}; L_{13}; L_{14}\}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что уточнение (усложнение) описания контура среды и структуры самой среды должно быть согласовано между собой и быть последовательным.

На основании формул (2) и (3) матрица формы  $[F]_0$  среды (сечения) может быть представлена с дробным показателем размерности  $\alpha$ , который в данном случае определяет структуру среды до и после формоизменения:

$$[F]_i^{\alpha_i} = [A_f]_i \times [F]_0^{\alpha_1}. \quad (4)$$

При этом величина размерности может быть определена как экспериментально, так и теоретически, что может служить дальнейшим развитием предлагаемого способа моделирования контура и структуры среды.

Рассмотрим матрицу формоизменения для нескольких последовательных процессов:



$$[F]_i = [A_f]_i \times [A_f]_{i-1} \times [A_f]_{i-2} \times \dots \times [A_f]_1 \times [F]_0. \quad (5)$$

Применяя подход, представленный в формуле (3) для каждой матрицы формоизменения, мы ее можем представить в виде:

$$[A_f]_1 = [A_f]_{1i} \times [A_f]_{1i-1} \times [A_f]_{1i-2} \times \dots \times [A_f]_{12} \times [A_f]_{11}. \quad (6)$$

Выражение (6) описывает процесс формоизменения для каждого процесса в дискретном виде, предлагая гипотезу о том, что формоизменение среды можно представить в таком виде и одинаковым на всем диапазоне всей величины конечной деформации:

$$[F]_i = [A_f]_i^n \times [A_f]_{i-1}^m \times \dots \times [A_f]_1^k \times [F]_0. \quad (7)$$

В общем случае величины  $n, m, k$  определяют количество элементов разбиения матрицы формоизменения для каждой операции и могут быть равны, и тогда выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$[F]_i^{\alpha_i} = [A_f]_i^n \times [F]_0^{\alpha_1}. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) показывает, что формоизменение среды можно представлять и моделировать как дискретное изменение элементов векторного пространства, которые являются составными и подобными друг другу с дробной размерностью.

**А.С. Лимарев, Ю.А. Шаймарданова**

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

## **УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЗА ПОЛОСОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ РЕССОР**

*Рассмотрены показатели качества проката горячекатаного полосового для автомобильных рессор. Проанализирована степень их влияния на долговечность и эксплуатационные свойства автомобильных рессор. А также определены причины образования торцевых трещин и предложены мероприятия по их устранению.*

*Ключевые слова: полосовой прокат, автомобильная рессора, торцевая трещина, качество проката, дефекты поверхности.*

Развитие автомобилестроения и машиностроения обуславливает постоянный спрос на полосовой прокат из рессорно-пружинных сталей. Это создает благоприятные условия для развития данного направления производства по расширению профильно-марочного сортамента рессорной полосы. В связи с этим особое значение приобретает выпуск высококачественной готовой продукции, отвечающей требованиям российских и зарубежных потребителей.

Среди основных потребителей рессорной полосы можно выделить ОАО «Горьковский автомобильный завод», ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «Белорецкий завод тракторных рессор и пружин». Поэтому в соответствии с ГОСТ Р 51585-2000 предпочтителен вариант использования ванадийсодержащих марок стали (50ХФА, 51ХФА, 50ХГФА, 55С2ГФ, 60С2ХФА) для изготовления рессорных полос для автомобилестроения.

При производстве рессор автомобилей в основном используют профили трапецевидного (ГАЗ, АЗЛК, ПАЗ и УАЗ) и Т-образного сечения (ЗИЛ, КраЗ,

МАЗ, КамАЗ), а на некоторых зарубежных автомобилях также желобчатые профили (рис. 1) [1].



Рис. 1. Виды рессорной полосы

Состояние рессорной полосы определяет эксплуатационные характеристики и долговечность автомобильных рессор. Это связано с тем, что они подвергаются постоянно изменяющимся статическим и динамическим нагрузкам, а также воздействию агрессивных сред, что сказывается как на безопасности пассажиров, так и работоспособности автомобиля в целом. К показателям качества рессорной полосы, оказывающим влияние на эксплуатационные характеристики рессор, относятся: точность геометрических размеров проката, механические свойства, качество поверхности, микроструктура, а также усталостная прочность.

Точность геометрических параметров проката наряду с эксплуатационными характеристиками определяет размеры рессор, что, в свою очередь, обеспечивает их надежность и взаимозаменяемость. В связи с этим к точности геометрических размеров профиля рессорной полосы и его формы предъявляются высокие требования с жесткими допустимыми отклонениями. Среди основных нормируемых параметров геометрии проката по ГОСТ 7419-90, оказывающих влияние на эксплуатационные свойства рессор, можно выделить предельные отклонения по толщине и ширине, разность по толщине кромок, серповидность и неплоскостность.

Механические свойства являются важнейшими характеристиками, обеспечивающими высокую надежность и долговечность рессор в процессе работы. Важнейшей характеристикой, гарантирующей надежную работу упругого элемента, является его сопротивление малым пластическим деформациям, т.е.

предел упругости [2]. Данный показатель можно определить по нормируемым показателям – пределам текучести и прочности. Наряду с необходимостью обеспечения эксплуатационных показателей при производстве проката следует также учитывать свойства, необходимые при изготовлении рессор, к которым в первую очередь относятся пластические свойства и вязкость металла. В ГОСТ 14959-79, нормирующем требования к прокату из рессорно-пружинной стали, эти показатели выражаются через твердость, относительное удлинение и относительное сужение.

Учитывая условия работы автомобильных рессор, особые требования предъявляют усталостной прочности как показателю, характеризующему их долговечность. Существует много факторов, влияющих на усталостную прочность стали: состояние поверхности, твердость, прокаливаемость, размер зерен, структура, остаточные напряжения, механические свойства и др. [2]. Среди отмеченных факторов твердость может являться причиной образования дефектов нарушения сплошности металла при холодной обработке, таких как трещины, сколы. Наличие таких дефектов отрицательно сказывается как на работоспособности, так и на эксплуатационных свойствах автомобильных рессор, поэтому для качественной обработки рессорной полосы резанием важно соблюдение твердости в заданных пределах. Для ванадийсодержащих марок рессорно-пружинной горячекатаной стали эти значения должны быть не более 321 НВ.

Поверхность автомобильной рессоры является наиболее нагруженным элементом, поэтому на ней недопустимо наличие каких-либо дефектов. В соответствии ГОСТ 14959-79 на поверхности не должно быть раскатанных пузырей, прокатных плен, закатов, раскатанных и раскованных загрязнений и трещин напряжения. Это обусловлено тем, что наличие микротрещин вблизи поверхности в результате воздействия асимметричных напряжений приводит к росту усталостных трещин вглубь.

Следует отметить, что необходимость раскроя металла на мерные длины значительно повышает вероятность образования трещин, в результате чего снижается качество готовой продукции. Так, при производстве рессорной поло-

сы на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в связи с конструктивными, техническими и технологическими особенностями оборудования стана существует вероятность образования торцевых трещин глубиной до 23 мм при низких температурах резки [3]. Это приводит к необходимости обрезки дефектных концов, и соответственно, к снижению производительности и уменьшению выхода годного. С целью разработки мероприятий по устранению торцевых трещин были определены основные факторы, влияющие на их образование:

- геометрические параметры рессорной полосы;
- повышенная твердость рессорно-пружинной стали;
- химический состав рессорно-пружинной стали;
- состояние и материал режущих кромок ножниц холодной резки;
- температурно-скоростные условия охлаждения;
- температура металла при резке.

Изменение геометрических и физико-химических параметров стали в большинстве случаев невозможно, поскольку требования к ним определяются заказчиком. Изменение температурных режимов прокатки, нагрева и охлаждения приведет к ухудшению механических свойств проката, снижению производительности, что нежелательно для производителей рессорной полосы. Поэтому наиболее перспективными вариантами являются изменения состояния и материала режущих кромок ножниц холодной резки. При выборе материала необходимо учитывать то, что твердость разрезаемого проката должна быть ниже твердости ножей.

В сортовом цехе ОАО «ММК» используют ножи из стали марки 6XB2C, которая наряду с остальными марками стали, прописанными в стандарте, выделяется повышенными показателями по твердости, однако не обладает необходимым уровнем прочности, имеет низкую эксплуатационную стойкость (3-5 дней). Ножи из этой стали выходят из строя по причине скола режущей кромки. Химический состав стали 6XB2C представлен в табл. 1 [3].

Таблица 1

## Химический состав марки стали 6XB2C

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	W	Cu
0,55-0,65	0,5-0,8	0,15-0,45	не более 0,4	не более 0,03	не более 0,03	1,0 – 1,3	2,2-2,7	не более 0,3

Согласно литературным данным [4] микролегирование этой марки стали молибденом и ванадием, вводимыми совместно с азотом, позволяет значительно улучшить свойства стали 6XB2C. Поэтому целесообразно использовать улучшенную марку стали 6XB2C (табл. 2).

Таблица 2

## Химический состав улучшенной марки стали 6XB2C

C	Si	Mn	Cr	W	V	N	Mo	Al
0,5-0,6	0,5-0,8	0,4-0,6	1,0 – 1,3	2,2-2,7	0,12-0,2	0,012-0,02	0,2-0,5	0,015-0,030

Применение данной дисперсионно-упрочненной стали с повышенной температурой отпуска позволяет повысить эксплуатационную стойкость ножей в 5-10 раз, по сравнению с ножами из стали 6XB2C стандартного состава. Модифицирование поверхности описанной стали воздействием импульсной плазмы, содержащей легирующие элементы W, N, C, позволяет повысить твердость в 2 раза. Такой эффект получается в результате создания нанокристаллической структуры толщиной до 60 мкм на режущей кромке ножей [5]. Использование ножей из улучшенной стали 6XB2C с импульсно-плазменной обработкой обеспечивает:

- повышение стойкости ножей холодной резки на станах горячей прокатки;
- повышение качества резки материалов;
- повышение эффективности производства;
- снижение количества обрезки дефектных концов.

**Библиографический список**

1. Пархиловский И. Г. Автомобильные листовые рессоры. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
2. Жадан В.Т., Воронцов Н.М., Кулак Ю.Е. и др. Производство проката из рессорно-пружинистой стали. М.:Металлургия, 1984. 216 с.
3. Исследование возможности бездефектного реза рессорных полос на ножницах холодной резки стана 450 ОАО «ММК» / Д.В. Назаров, Ю.А. Бодяев, С.Н. Ушаков, А.Ю. Дзюба, А.В. Бондаренко, Ю.В. Симаков, Р.В. Новицкий // Труды восьмого конгресса прокатчиков (том II), Магнитогорск, 11-15 октября 2010. С. 321-324.
4. Улучшение марки 6XB2C для ножей Веццани / А.Б. Юрьев, Л.А. Годик, Н.А. Козырев, Л. В. Корнева, Г.Н. Тарасов // Черная металлургия. 2008. №4. С. 90-91.
5. Структура и свойства модифицированного плазмой слоя на рабочей поверхности ножей для резки проката в металлургическом производстве / Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, А.Н. Тищенко, М.Т. Ковалева, М.С. Прозорова, М.Ю. Арсеенко, М.Ю. Смолякова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 3. С. 28-33.

## К ВОПРОСУ О ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОПИСАНИЯ ФОРМЫ КАЛИБРОВ

*Математическое моделирование процессов сортовой прокатки считается адекватным при условии априорно заданной точности вычислений. Для определения такого уровня точности необходимо установить степень дискретизации объектов, входящих в состав математической модели. Данная работа направлена на установление оценки достаточной дискретизации описания геометрической формы калибров, используемых при прокатке простых профилей.*

*Ключевые слова: дискретизация описания профиля, калибровка профилей, сортовой прокат, структурно-матричный подход.*

Для решения современных задач обработки металлов давлением (ОМД) при помощи математического моделирования необходимо определить и обозначить точность вычислений априори. Результаты расчётов не должны быть более точными, чем возможности систем управления, которые реализуют воздействие на систему, переводя её в требуемое целевое состояние.

Зачастую исходная информация для разных систем моделирования должна соответствовать требованиям всех этих систем по критериям точности описания. Это делается для обеспечения адаптивности таких данных и моделей.

В работах Тулупова О.Н. магнитогорской сортопрокатной научной школы отмечается [1], что проблему адаптивности следует рассматривать в двух аспектах:

- адаптивность моделей и систем к различным технологическим схемам и изменяющимся условиям ОМД;



– адаптивность к конкретным технологическим задачам.

Тулупов О.Н. делает вывод, что: «Разработка на единой математической основе и единых принципах представления информации комплекса адаптивных моделей, соответствующих вышеперечисленным требованиям и предназначенных для решения задач оперативного анализа технологических схем с элементами управления формоизменением профиля при сортовой прокатке, является актуальной научно-технической проблемой».

В рамках данной статьи рассмотрим вопрос, связанный с точностью описания формы калибров для передачи их геометрических размеров и особенностей в математические модели на основе структурно-матричного подхода. Эти модели могут находить широкое применение для решения вопросов управления сортопрокатным производством [2].

Задачей данного исследования являлось установление необходимой и достаточной степени дискретизации при описании формы и геометрии калибров простой формы.

Оцифровка ручьёв калибров, а также всего межвалкового зазора в пределах одного ручья производилась на основе известного описания, базирующегося на структурно-матричном подходе [2], разработанном на кафедре обработки металлов давлением Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Это описание позволяет получить цифровые аналоги чертежей калибров и калибровки двух-, трёх-, четырёхвалковых систем, а также простых и фасонных профилей различной сложности.

**Описание «по железу»** (рис. 1). Особенность данного вида описания состоит в том, что длина векторов, попадающих в межвалковый зазор, ограничивается вертикальной линией в месте окончания выпуска.

**Описание «бесконечный вектор»** (рис. 2). Векторы, описывающие контур калибра, продляются до пересечения с буртом (или гладкой бочкой) кроме последнего вектора, принимающего максимально возможное значение, взятое из проекции самого длинного вектора на ось, разделяющую зазор пополам.

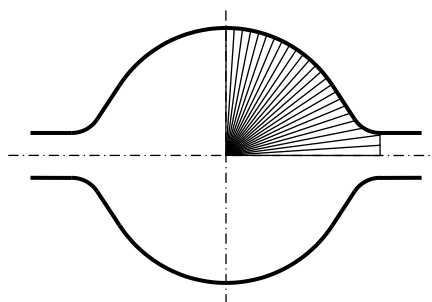


Рис. 1. Описание «по железу»

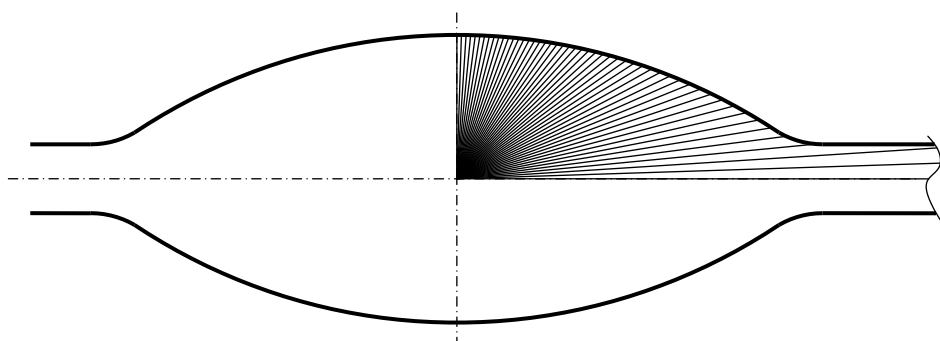


Рис. 2. Описание по «бесконечному вектору»

**Описание «нулевой зазор» (рис. 3).**

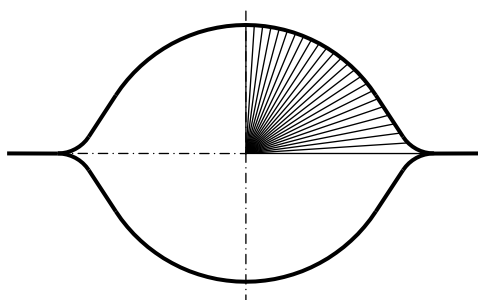


Рис. 3. Описание «нулевой зазор»

Цифровой чертёж производился в среде AutoCAD, где существует возможность оценки точности описания калибра за счёт сравнения точного значения площади калибра и ее приближенного значения, полученного из площадей треугольников, образованных векторами. Методика состоит в следующем: при сравнении площадей (рис. 4) выявляется отклонение значения  $S_2$  от  $S_1$ .

Следует отметить, что значение  $S_1$  мы определяли в среде AutoCAD, где есть возможность вычисления площадей сложных фигур с точностью до восьмого знака.

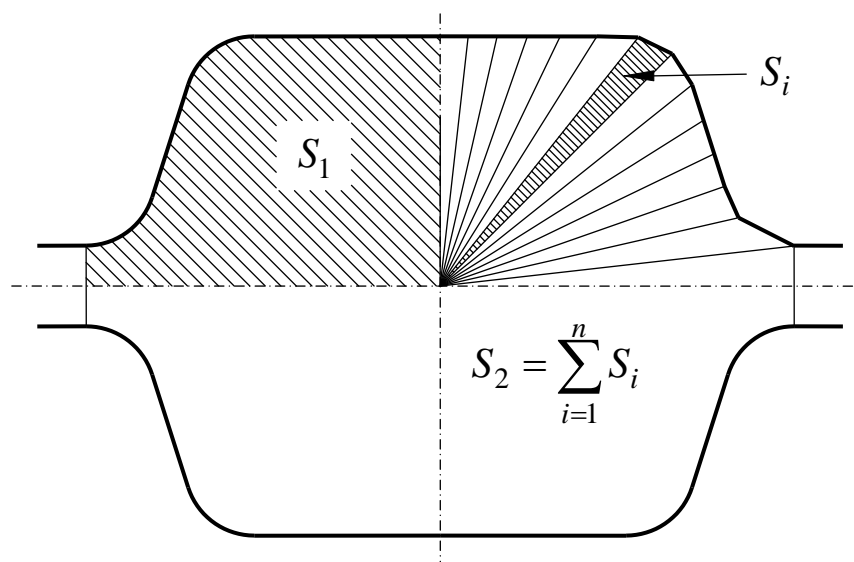


Рис. 4. Точное и приближенное значение площади калибра

Разница площадей  $S_1$  и  $S_2$  формируется из-за существующей и неизбежной потери информации при дискретном описании калибра (рис. 5).

Площадь, вычисленная на основе численных значений векторов, является суммой площадей треугольников, образованных векторами, и определяется по формуле:

$$S_2 = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (1)$$

Площадь каждого треугольника определяется по формуле:

$$S_i = \frac{a_i a_{i-1}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{(2(n-1))}\right), \quad (2)$$

где:  $i$  — номер треугольника,

$n$  — число векторов,

$a_i$  и  $a_{i-1}$  — длины векторов.

Таким образом, получаем разницу площадей  $\Delta S = S_1 - S_2$ .

Частично данный вопрос дискретизации был рассмотрен автором в диссертационной работе [5]. В продолжение исследования была поставлена аналогичная задача для более широкого спектра калибров.

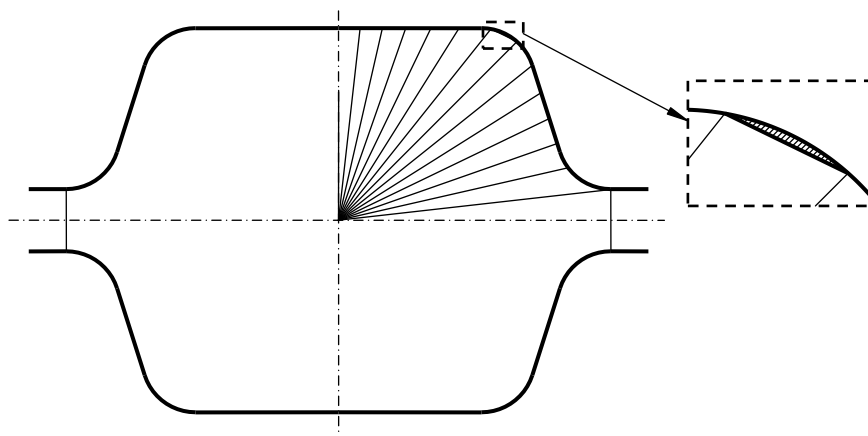


Рис. 5. Потеря информации при оцифровке калибра

Были выбраны 44 чертежа двухвалковых калибров на основе типовых чертежей фирмы «Danieli», являющейся производителем сортопрокатных станов 170, 370 и 450 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Калибры подбирались различных форм и размеров для того, чтобы обеспечить учет всего спектра простых калибров, которые могут относиться к классическим представителям тех или иных форм (ящичный, круглый, овальный и т.п.). Одним из условий выбора было соблюдение строгого правила – выбирать только те калибры, которые имеют две оси симметрии.

Выбирали следующие уровни дискретизации: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 2500, 5000 и 10000 векторов на четверть калибра. Для описания формы калибра была выбрана методика «по железу», так как она зарекомендовала себя в большинстве используемых математических моделях на основе структурно-матричного подхода. В результате вычислений (на основе построенных векторов) были получены 484 площади фигур для 11 уровней дискретизации 44 калибров. Сорок четыре значения площади были получены в среде AutoCAD, которая производит расчёты с максимальной точностью до восьмого знака после запятой по принципу интегрирования кусочных функций, из которых состоит кривая, описывающая форму калибра. Результатом сравнения является отклонение площади  $S_2$  от площади  $S_1$ :

$$\delta = \frac{S_1 - S_2}{S_1} 100. \quad (3)$$

Отклонения для всех 44 калибров представлены в табл. 1.

Кроме площадей производили расчёт периметра четверти калибра, значение которого также зависит от степени дискретизации. Относительную ошибку для расчёта периметра вычисляли аналогично. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 6, 7 с использованием логарифмической шкалы.

Стоит отметить, что наблюдается резкое возрастание ошибки при самой высокой степени дискретизации. Это объясняется тем, что в среде Microsoft Excel при вычислении тригонометрических функций происходит существенное накопление ошибки при работе с плавающей запятой в связи с очень малыми значениями угла между векторами, для которого производится расчёт. Накопленная ошибка сказывается на результате вычислений для максимальной степени дискретизации. Из рис. 7 видно, что периметр и точность его расчёта сильно зависят от формы и геометрии калибра. Чтобы определиться с необходимой и достаточной степенью дискретизации, обратим внимание на допустимые ошибки на основе теории вероятности и математической статистики (табл. 3). Проанализировав данные из рис. 6, 7 и табл. 3, можно сделать следующие выводы:

- необходимая и достаточная степень дискретизации для уровня 3-х сигм составляет 200 векторов на четверть калибра;
- максимальная степень дискретизации для уровня 4-х сигм составляет 2500-3000 векторов на четверть калибра, так как системы автоматизированного управления основными параметрами прокатного стана не могут обеспечить большую точность по причине ограниченной дискретизации самих управляемых параметров, например, зазора между валками.

Подводя итоги, можно отметить, что для решения большинства задач управления процессом сортовой прокатки необходимым и достаточным уровнем дискретизации описания четверти формы калибра будет значение в 200 векторов, которое обеспечивает статистическую ошибку в пределах трёх стандартных отклонений.

Таблица 1

## Процентное отклонение площадей

№ калибра	10000	5000	2500	2000	1000	500	200	100	50	20	10
001	0,006037	0,000015	0,000060	0,000066	0,000012	0,001069	0,000861	0,006219	0,059368	0,113304	0,938588
002	0,004682	0,000021	0,000064	0,000081	0,000008	0,000780	0,005784	0,019034	0,067725	0,186953	1,061230
003	0,009529	0,000008	0,000034	0,000046	0,000280	0,000362	0,000176	0,015624	0,061395	0,099590	0,942625
004	0,005798	0,000010	0,000079	0,000100	0,000000	0,001049	0,008884	0,031872	0,100274	0,377589	1,479778
109	0,004188	0,000004	0,000025	0,000040	0,000125	0,000340	0,003767	0,010711	0,062201	0,304861	0,819706
110	0,009786	0,000001	0,000005	0,000010	0,000050	0,000171	0,000914	0,004984	0,018259	0,090737	0,323672
114	0,004104	0,000004	0,000016	0,000024	0,000077	0,000257	0,002266	0,010502	0,039527	0,165001	1,045374
136	0,003917	0,000005	0,000020	0,000015	0,000137	0,000463	0,003027	0,008988	0,053522	0,329382	1,142756
146	0,009979	0,000002	0,000006	0,000010	0,000037	0,000145	0,001032	0,004393	0,017189	0,107374	0,433339
201	0,004867	0,000014	0,000024	0,000021	0,000130	0,001174	0,000790	0,006047	0,069678	0,104465	0,966890
202	0,007725	0,000008	0,000025	0,000005	0,000089	0,000821	0,003696	0,015258	0,034386	0,163699	0,961634
203	0,005228	0,000009	0,000040	0,000083	0,000232	0,000232	0,002897	0,002646	0,062716	0,122408	0,877070
204	0,009492	0,000010	0,000014	0,000008	0,000094	0,000635	0,000115	0,018758	0,025082	0,144136	1,031964
205	0,005131	0,000019	0,000100	0,000063	0,000506	0,001932	0,011361	0,037980	0,084243	0,100206	1,758641
219	0,003384	0,000024	0,000047	0,000042	0,000134	0,001108	0,010168	0,028538	0,075802	0,123992	1,469525
225	0,007287	0,000030	0,000160	0,000043	0,000690	0,000149	0,010743	0,042264	0,144086	0,752761	1,156327
226	0,014300	0,000012	0,000059	0,000064	0,000333	0,001125	0,003809	0,020155	0,067580	0,352624	0,746006
227	0,009766	0,000006	0,000019	0,000005	0,000149	0,000464	0,003161	0,008318	0,021002	0,338363	0,835404
229	0,016190	0,000007	0,000019	0,000041	0,000138	0,000618	0,003058	0,007123	0,061090	0,367146	1,087823
242	0,010648	0,000006	0,000016	0,000036	0,000117	0,000184	0,003634	0,010253	0,040191	0,069444	0,173344
260	0,003626	0,000012	0,000069	0,000038	0,000333	0,001728	0,000706	0,016106	0,105393	0,278489	1,529059
265	0,015110	0,000002	0,000015	0,000019	0,000088	0,000335	0,002140	0,008330	0,031617	0,212889	0,664112
274	0,005835	0,000013	0,000101	0,000132	0,000048	0,001659	0,008322	0,007994	0,022291	0,305290	0,396011
275	0,010481	0,000001	0,000046	0,000060	0,000306	0,001024	0,004085	0,017725	0,032979	0,039715	0,965027
289	0,005948	0,000029	0,000034	0,000196	0,000480	0,000043	0,005194	0,021185	0,056277	0,228055	0,265167
290	0,010625	0,000002	0,000037	0,000036	0,000152	0,000751	0,001477	0,000561	0,041976	0,115281	0,870065
291	0,006027	0,000012	0,000061	0,000111	0,000492	0,000193	0,001876	0,018870	0,007827	0,268521	0,272965
292	0,010654	0,000010	0,000010	0,000054	0,000129	0,000805	0,004635	0,006213	0,001613	0,008251	0,981268
328	0,006168	0,000026	0,000005	0,000087	0,000014	0,001020	0,003048	0,017948	0,062954	0,151162	0,101762
370	0,028637	0,000006	0,000072	0,000062	0,000406	0,001301	0,009741	0,027546	0,137652	0,571043	0,872710
371	0,024624	0,000012	0,000026	0,000024	0,000307	0,000779	0,003592	0,006236	0,003581	0,553188	2,652743
375	0,030644	0,000014	0,000072	0,000106	0,000473	0,001660	0,011577	0,039610	0,089745	0,251852	0,439211
531	0,002993	0,000033	0,000165	0,000010	0,000775	0,001841	0,012119	0,022398	0,000894	0,503069	1,133494
532	0,009967	0,000005	0,000005	0,000032	0,000044	0,000624	0,003944	0,008582	0,052782	0,205511	0,655433
534	0,014709	0,000006	0,000015	0,000000	0,000169	0,000427	0,001474	0,014459	0,054127	0,234133	0,604400
585	0,003287	0,000013	0,000008	0,000092	0,000240	0,000161	0,006261	0,005661	0,006565	0,362377	1,041419
763	0,003424	0,000013	0,000044	0,000013	0,000069	0,001207	0,005643	0,012622	0,069956	0,087172	1,242432
818	0,017395	0,000010	0,000025	0,000062	0,000202	0,000706	0,006273	0,016511	0,025374	0,478205	1,307350
854	0,013840	0,000004	0,000025	0,000017	0,000049	0,000568	0,001343	0,000241	0,071350	0,093560	0,653129
855	0,002121	0,000023	0,000047	0,000036	0,000083	0,001546	0,007910	0,017096	0,042376	0,551774	1,820773
920	0,035077	0,000022	0,000067	0,000085	0,000252	0,000591	0,013208	0,036514	0,083709	0,307910	0,994473
922	0,003391	0,000009	0,000026	0,000036	0,000085	0,000857	0,005248	0,017819	0,076728	0,131528	1,847992
923	0,017018	0,000005	0,000015	0,000019	0,000045	0,000478	0,000306	0,011623	0,030871	0,199745	0,996178
933	0,032066	0,000006	0,000018	0,000078	0,000378	0,001150	0,005404	0,034966	0,094272	0,768635	1,941983

Таблица 2

## Процентное отклонение периметров

№ калибра	10000	5000	2500	2000	1000	500	200	100	50	20	10
001	0,00321	0,00009	0,00013	0,01008	0,01008	0,05433	0,05707	0,06601	0,39773	0,30335	1,18974
002	0,00242	0,00041	0,01076	0,01103	0,01103	0,01173	0,01691	0,03237	0,38214	0,29999	1,07057
003	0,00220	0,00609	0,00653	0,02436	0,02436	0,02494	0,12697	0,18402	0,47024	0,25949	1,22378
004	0,00100	0,00676	0,01023	0,01043	0,01043	0,01069	0,01292	0,01993	0,45684	0,13985	1,50902
109	0,00176	0,00087	0,00390	0,00597	0,00597	0,00647	0,04729	0,06464	0,18029	0,39405	0,47859
110	0,00418	0,00014	0,00015	0,00148	0,00148	0,00201	0,00319	0,01521	0,02577	0,03773	0,06222
114	0,00232	0,00055	0,00114	0,00152	0,00152	0,00165	0,01155	0,03021	0,05751	0,05769	0,39680
136	0,00199	0,00112	0,00225	0,00616	0,00616	0,01029	0,02432	0,02830	0,12700	0,31777	0,58254
146	0,00435	0,00005	0,00006	0,00007	0,00007	0,00008	0,00106	0,00313	0,00641	0,02212	0,06343
201	0,00217	0,00571	0,01406	0,00610	0,00610	0,05232	0,05527	0,06643	0,40532	0,36269	1,30869
202	0,00088	0,00377	0,01144	0,00396	0,00396	0,04513	0,08533	0,24016	0,26331	0,56745	1,38157
203	0,00065	0,00714	0,00769	0,03463	0,03463	0,06478	0,08244	0,09043	0,38885	0,35500	0,89730
204	0,00321	0,00527	0,01248	0,02426	0,02426	0,03122	0,04248	0,23140	0,23905	0,55474	1,43467
205	0,00110	0,00551	0,01102	0,02261	0,02261	0,07420	0,12989	0,34819	0,36922	0,96377	1,62689
219	0,00186	0,00629	0,01653	0,03677	0,03677	0,05204	0,14945	0,32689	0,35865	0,75471	1,22157
225	0,00215	0,00085	0,00087	0,02339	0,02339	0,02359	0,02555	0,03211	0,47233	1,09810	1,12852
226	0,00149	0,00311	0,01151	0,02029	0,02029	0,05765	0,02367	0,19568	0,42803	0,77761	0,89879
227	0,00348	0,00171	0,00307	0,00866	0,00866	0,01525	0,03260	0,03821	0,04889	0,42428	0,50887
229	0,00376	0,00302	0,00321	0,01008	0,01008	0,03777	0,04461	0,04849	0,32583	0,81557	1,14401
242	0,00405	0,00405	0,00434	0,02357	0,02357	0,04139	0,09683	0,21463	0,26631	0,32656	0,59012
260	0,00050	0,00806	0,00879	0,02719	0,02719	0,05321	0,05488	0,06245	0,47251	0,24489	1,34078
265	0,00442	0,00026	0,00156	0,00365	0,00365	0,00733	0,01953	0,03820	0,09082	0,26277	0,42360
274	0,00102	0,00212	0,00354	0,01587	0,01587	0,06437	0,16448	0,17069	0,18756	0,87025	0,94540
275	0,00267	0,00210	0,01280	0,00234	0,00234	0,05666	0,11316	0,29512	0,49252	0,57072	1,58237
289	0,00158	0,00760	0,00799	0,03153	0,03153	0,03359	0,05206	0,07061	0,17253	0,74845	0,77963
290	0,00144	0,00661	0,00808	0,01697	0,01697	0,05580	0,15116	0,24559	0,38182	0,54506	1,43489
291	0,00007	0,00814	0,00852	0,03283	0,03283	0,03489	0,17640	0,23532	0,28575	0,77900	0,78911
292	0,00356	0,00505	0,00522	0,01916	0,01916	0,05981	0,14889	0,16163	0,25668	0,47109	1,55277
328	0,00055	0,00590	0,00609	0,03952	0,03952	0,04512	0,04769	0,05906	0,09687	0,56558	0,56658
370	0,00307	0,00539	0,01669	0,04089	0,04089	0,04754	0,16545	0,18552	0,68129	0,86937	0,95965
371	0,00180	0,00637	0,00857	0,03262	0,03262	0,03598	0,09701	0,15418	0,19452	1,70699	3,13823
375	0,00209	0,00554	0,01700	0,04114	0,04114	0,04900	0,19569	0,26860	0,41977	0,66129	1,15334
531	0,00106	0,00103	0,00112	0,03467	0,03467	0,08209	0,17703	0,18912	0,22562	0,91547	1,59943
532	0,00210	0,00225	0,00229	0,02210	0,02210	0,03286	0,10099	0,10820	0,38776	0,82937	1,34844
534	0,00281	0,00266	0,00275	0,01564	0,01564	0,01637	0,07862	0,13847	0,35682	0,70255	1,09835
585	0,00032	0,00692	0,01480	0,01749	0,01749	0,01810	0,10929	0,11889	0,16504	1,04798	1,28677
763	0,00086	0,00607	0,00641	0,02553	0,02553	0,04257	0,14793	0,25448	0,36722	0,74734	1,70936
818	0,00403	0,00771	0,01433	0,03133	0,03133	0,04522	0,17985	0,21040	0,22158	1,59455	2,03146
854	0,00178	0,00441	0,01047	0,01996	0,01996	0,06953	0,09043	0,09879	0,65651	0,78683	1,64999
855	0,00076	0,00648	0,00666	0,03436	0,03436	0,04786	0,16797	0,28917	0,43031	1,13152	1,86410
920	0,00424	0,00420	0,00763	0,01989	0,01989	0,02314	0,12382	0,19896	0,26186	0,55165	1,23626
922	0,00218	0,00360	0,00653	0,00471	0,00471	0,03685	0,08082	0,17468	0,28573	0,26912	1,65023
923	0,00518	0,00319	0,00352	0,01078	0,01078	0,02870	0,01400	0,14391	0,15598	0,42508	1,19369
933	0,00510	0,00255	0,00280	0,01264	0,01264	0,03092	0,05425	0,09341	0,10732	0,43390	0,61576

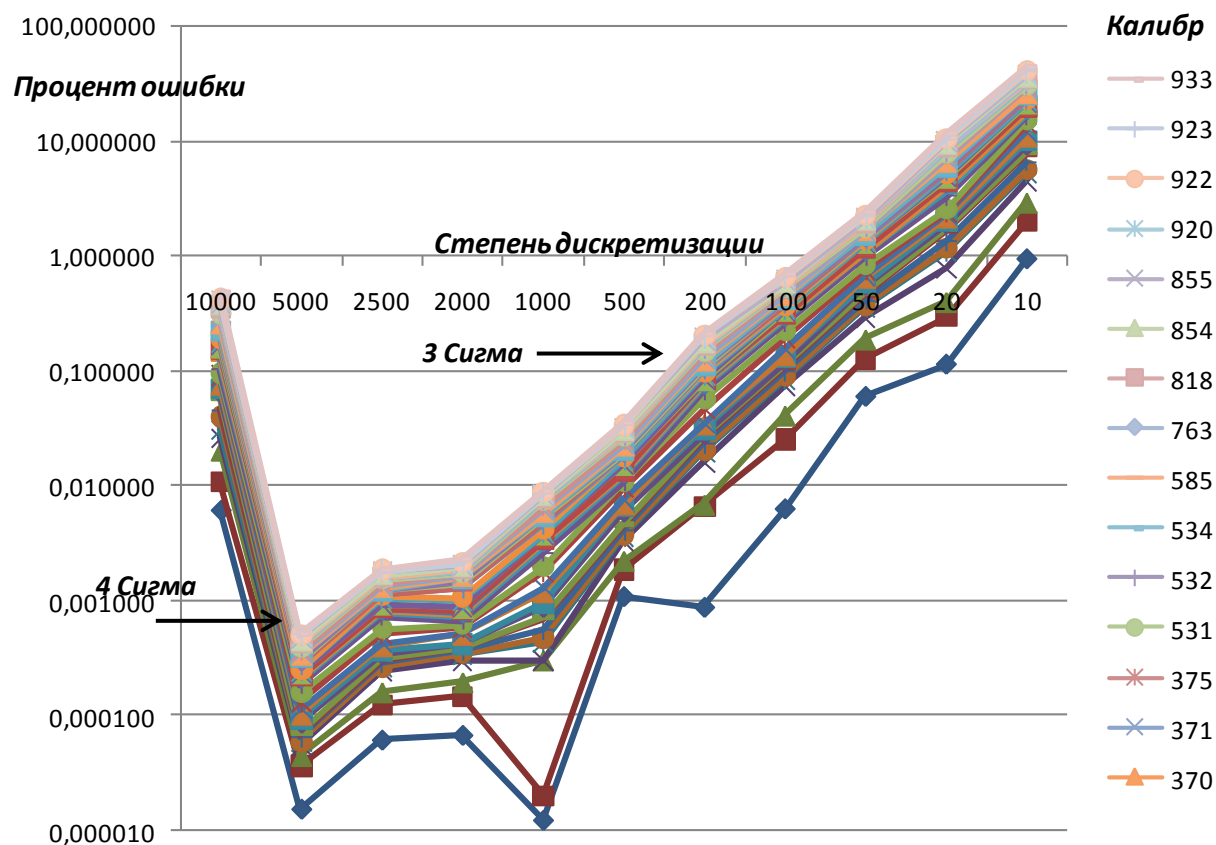


Рис. 6. Ошибка вычисления площади для разных степеней дискретизации

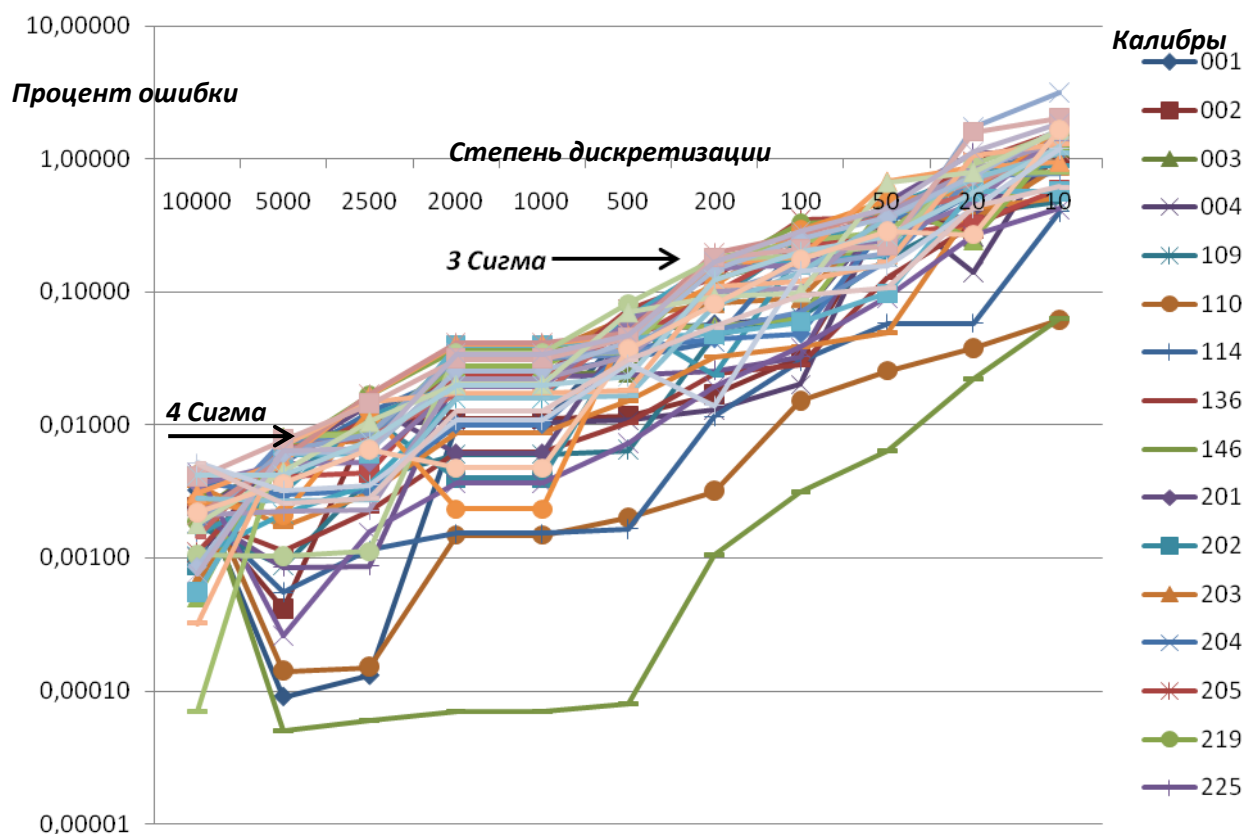


Рис. 7. Ошибка вычисления периметра для разных степеней дискретизации



Таблица 3

## Ошибка для «сигма уровней»

Ошибка, %	99,9997	99,9992	99,999	99,997	99,99	99,985	99,977	99,952	99,932	99,904	99,865
Сигма уровень	4,50	4,31	4,26	4,01	3,81	3,62	3,50	3,30	3,20	3,10	3,00

Однако для каждой отдельно взятой задачи управления требуется априори задать нужный уровень точности и только потом принимать решение о выборе степени дискретизации.

### Библиографический список

1. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: Дис. ... докт. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 385 с.
2. Тулупов О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортов прокатки: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 224 с.
3. 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.
4. Мутьев М.С. О разбивке калибра на элементы при прокатке с неравномерным обжатием // Технический прогресс в технологии прокатного производства: тр. конф. 12-15 мая 1959 г. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. С. 290-303.
5. Левандовский С.А. Повышение результативности сортовых станов путем совершенствования модели управления качеством: Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006.

**Д.И. Кинзин**

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

## **ЗАНИМАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ.**

### **ЗАДАЧА ПЕРВАЯ**

В свои школьные и студенческие годы автор провел немало времени за чтением научно-популярной литературы, значительную долю которой составляли сборники занимательных задач по математике и физике, что во многом и пробудило тот интерес к научному творчеству, который привел его в науку. Во время работы в калибровочном бюро Магнитогорского металлургического комбината, будучи уже кандидатом наук, ему приходилось сталкиваться с весьма любопытными вопросами, которые теперь имели не только занимательный характер (может быть, этот характер замечал только он), но и вполне реальное значение для технологического процесса.

Автор хотел бы поделиться с коллегами некоторыми занимательными, на его взгляд, задачами, которые ему приходилось решать во время работы в калибровочном бюро. Конечно, будни металлургического производства не располагают к созерцательности и праздным умозаключениям, но, возможно, эти задачи помогут сделать рутинный и обыденный труд более осмысленным и интересным.

Автор планирует приводить по одной задаче в каждом выпуске журнала, пытаясь продемонстрировать необычные и удивительные стороны прокатного производства. Данные задачи можно использовать в качестве творческого задания для студентов и аспирантов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением». Кроме того, они будут полезны и производственникам, так как их источником послужил опыт работы в сортопрокатном цехе.

Предлагаемые задачи существенно отличаются по степени трудности, поэтому читатели с различным уровнем подготовки смогут найти пищу для сво-

его интеллекта. Вместе с тем, опыт автора показывает, что даже самые сложные задачи могут быть решены хорошо подготовленными студентами при приложении достаточных усилий.

Итак, условие первой задачи.

Дано две клетки непрерывного крупносортового стана (рис. 1).

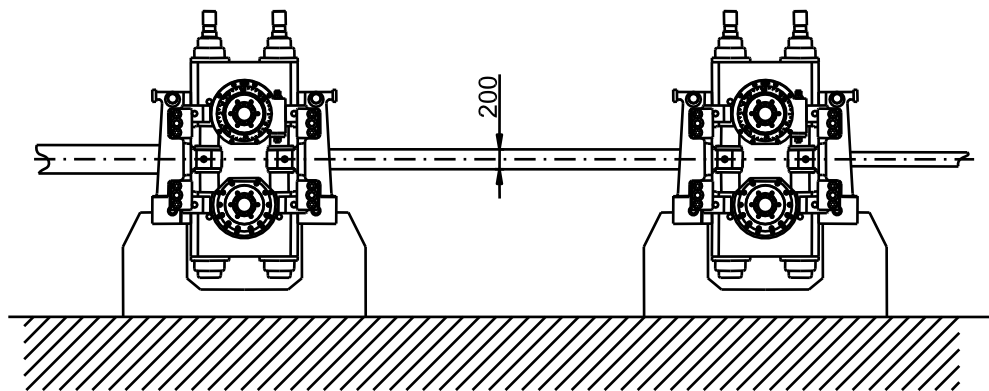


Рис. 1. К условию задачи

Вальцовщику было известно, что высота раската между клетями составляет точно 200 мм, при этом во время прокатки в межклетевом промежутке на раскат не действовали продольные силы (откуда вальцовщик всё это знал, история умалчивает, но факт остается фактом).

В процессе прокатки произошла мгновенная и одновременная остановка валков во всех клетях стана по причине аварийного отключения двигателей, при этом раскат остался в валках и в таком состоянии остыл до комнатной температуры. После чего вальцовщик измерил высоту раската в межклетевом промежутке с помощью штангенциркуля. Какое значение толщины раската получил вальцовщик, если точно известно, что коэффициент температурной усадки составляет 1,015? Сразу отметим, что очевидный на первый взгляд ответ — 197,05 мм является неверным.

Решение, которое автор считает правильным, будет опубликовано в следующем номере журнала. Читатели, которые хотят раньше узнать правильно ли они решили задачу, могут прислать свои решения на [kinzin@passdesign.ru](mailto:kinzin@passdesign.ru). Также вы можете прислать свои критические замечания и отзывы.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Арцибашев Вячеслав Вячеславович** – канд. техн. наук, старший менеджер отдела инвестиционных программ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология сортовой прокатки. E-mail: arc@mmk.ru.

**Асанов Валерий Николаевич** – калибровщик ООО «Литон технология», г. Жлобин. Тел. +375447701411.

**Березов Сергей Николаевич** – генеральный директор ООО «Литон технология», г. Москва. Тел. +79091618222. E-mail: 5001111@mail.ru.

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

**Левандовский Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Обработка 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.

**Лимарев Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологий, сертификации и сервиса автомобилей» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: управление качеством сортопрокатных технологических систем. Тел. 89048040221. E-mail: aslimarev@mail.ru.

**Рычков Сергей Сергеевич** – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: теория и технология сортовой прокатки. E-mail: serge.rychkov@gmail.com.

**Стеблов Анвер Борисович** – д-р. техн. наук, технический директор ООО «Литон технология», г. Москва. Область исследований: металлургия чёрных металлов, обработка металлов давлением, металловедение, прикладная математика. Тел. +79151841943. E-mail: Anver\_Steblov@mail.ru.

**Шаймарданова Юлия Азаматовна** – студент кафедры «Технологий, сертификации и сервиса автомобилей» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Область исследований: управление качеством сортопрокатных технологических систем. Тел. 89681216309. E-mail: yulchik.89@mail.ru.