

Рис. 5. Усредненные гистограммы

На рис. 5 показан график гистограммы оранжевого цвета для ткани с патологией, изображенной на рис. 4, а, и график синего цвета для здоровой ткани, изображенной на рис. 4, б.

Разработанное программное обеспечение позволило улучшить результаты топической диагностики заболеваний паращитовидных желез с использованием метода конфокальной лазерной микроскопии и методов машинного обучения с 69 до 86 % по сравнению с традиционными лабораторными исследованиями.

Во время работы над проектами необходимо отметить активное участие заведующего кафедрой «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого К. С. Курочки, заведующего нейрохирургическим отделением № 1 ГОКБ Е. Л. Цитко, заведующего отделением трансплантологии ГУ «РНПЦ РМиЭЧ» А. В. Величко.

#### Литература

1. Зиннатова, Н. Х. Биомеханический метод диагностики состояния позвоночника в норме и при патологиях / Н. Х. Зиннатова / Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2009. – № 10. – С. 108–113.
2. Гладков, А. В. Клиническая биомеханика в диагностике патологии позвоночника / А. В. Гладков, Е. А. Черепанов // Хирургия позвоночника. – 2004. – № 1. – С. 103–109.
3. Ахмедов, Ш. Ч. Статика и биомеханика позвоночника в норме: обзор / Ш. Ч. Ахмедов, А. Р. Сатторов, А. К. Кобиллов // Неврология. – 2013. – № 3. – С. 44–49.

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

**И. В. Астапенко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлены результаты исследования влияния длительности временных выдержек при циклическом (маятниковом) сфероидизирующем отжиге бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на степень полноты трансформации пластинчатого перлита в зернистый. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму, позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,8 мкм.*

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, время циклических изотермических выдержек, обезуглероженный слой, цементитные пластины и глобулы.

### Введение

Классическая теория обработки металлов давлением как раздел прикладной механики деформируемого твердого тела, определяющий инженерные методы решения упрощенных задач механики деформируемого твердого тела, сложилась как наука примерно в 20-х гг. прошлого века. Идущая ей на смену наука, называемая «Теория компьютерного моделирования процессов ОМД», в настоящее время интенсивно развивается. Вариационные принципы механики известны давно, но развитие численного метода решения задач механики – метода конечных элементов (МКЭ), использующего эти принципы, началось примерно с середины 50-х гг. прошлого века.

В процессе прокатки заготовка формируется посредством нескольких проходов через валки с различной формой калибров. Для повышения эффективности производства и качества продукции при моделировании процесса должно быть оптимизировано количество проходов и калибровка валков. Численный анализ процесса прокатки позволяет уменьшить число проб и ошибок на стадии проектирования и учесть влияние параметров процесса, таких как напряжение, интенсивность деформации и распределение температуры, на заготовку, информацию о которых трудно получить экспериментально.

В настоящее время существуют различные коммерческие конечно-элементные системы автоматизированного проектирования, такие как Simufact Forming, DEFORM, QFORM, MARC, LS-DYNA, ABAQUS, в которых имеется возможность моделирования различных процессов обработки металлов давлением (ОМД).

Все современные системы моделирования в значительной степени базируются на численных методах анализа, наиболее эффективным из которых является МКЭ. Исследование технологических процессов ОМД проводится на конечно-элементных моделях, описывающих движение сплошной среды на основе подхода Лагранжа. Объем деформируемой заготовки разбивается на элементарные объемы, образующие сетку лагранжевых конечных элементов, узлы которой принадлежат материалу заготовки.

Однако моделирование такого процесса, как прокатка требует часов машинного времени. При разработке оптимальных режимов деформации и конструировании оборудования время расчета является одним из важных факторов. В связи с этим многие исследователи заняты поиском «быстрого» алгоритма, который не приведет к существенному снижению адекватности полученных расчетов.

Исследованию технологических параметров и износа валков при горячей прокатке различных сортов профилей посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. Кроме того, затруднено установление закономерностей распределения износа и связанных с ним факторов по контактной поверхности, поскольку расчет последних в ранних работах выполнен с большим количеством допущений и упрощений. Существующие модели, применяемые для прогнозирования износа валков, недостаточно учитывают особенности пластической деформации, а также содержат в своей структуре неопределенные по величине и смыслу эмпирические коэффициенты [1].

Изложенное выше позволяет считать актуальным проведение исследований методами численного моделирования процессов горячей сортовой и трубной прокатки с целью совершенствования калибровки валков и режимов горячей прокатки сорта и труб на непрерывных станах. Наибольший интерес представляет применение численного моделирования при разработке или совершенствовании калибровки валков.

**Совершенствование калибровки валков горячей сортовой прокатки.** Процесс прокатки в черновой группе клетей (ЧГК) стана 320 имеет ряд особенностей. Все восемь клетей ЧГК имеют горизонтальное расположение валков. Обжатие осуществляется в парах калибров «овал – круг», с последующей кантовкой раската после осесимметричного калибра. Для этого за нечетными клетями установлены кантовочные коробки для упругопластического поворота полосы на угол  $90^\circ$ .

Калибровка валков первой клетки должна обеспечивать надежный захват при высокой деформирующей способности, однако штатный калибр не удовлетворял этим условиям – захват был ненадежным и на поверхность калибров электросваркой наносились «шипы», существенно снижавшие ресурс эксплуатации валка (рис. 1).

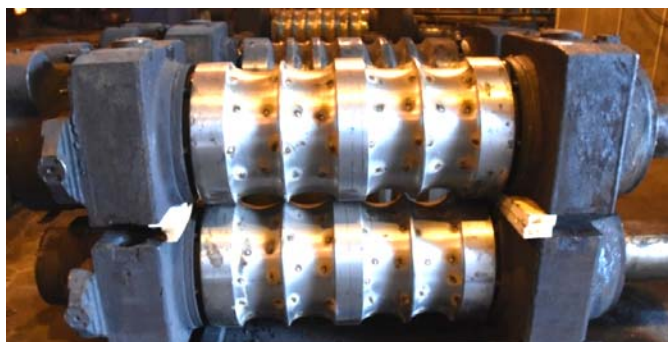


Рис. 1. Валковый блок клетки № 1 стана 320 с нанесенной сварочной шагренью

Калибр валка в клетке № 1 имеет геометрию профиля типа «3-радиусный овал» (рис. 2). Такие калибры нашли широкое применение на средне-, мелкосортных и проволочных станах.

Достоинства калибра:

- высокая вытяжная способность ( $\lambda$  до 2,0), что позволяет поддерживать высокую температуру раската, уменьшить число пропусков и снизить расход энергии;
- калибры имеют относительно небольшую глубину ручья.

Недостатки калибра:

- неравномерное распределение деформации по ширине калибра, что приводит к увеличению напряжения в металле, быстрому износу валков и увеличению расхода энергии;
- плохая устойчивость овальной полосы в последующем круглом калибре.

Также необходимо отметить, что при глубоком термоциклическом износе калибра, съем металла при переточке, которая достигает 20 мм за съем, на выпусках сильно ограничен. Поэтому валки после 2-й или 3-й переточки приходится списывать.

Эти недостатки значительно осложняют работу стана, поскольку черновая группа клетей № 1–8 имеет универсальную калибровку для всего профильного и размерного сортамента стана.

Для решения указанных проблем был разработан усовершенствованный вариант калибра 1-й клетки. Вместо трехрадиусного базового калибра (рис. 2, а) была предложена схема с прямыми выпусками (рис. 2, б).

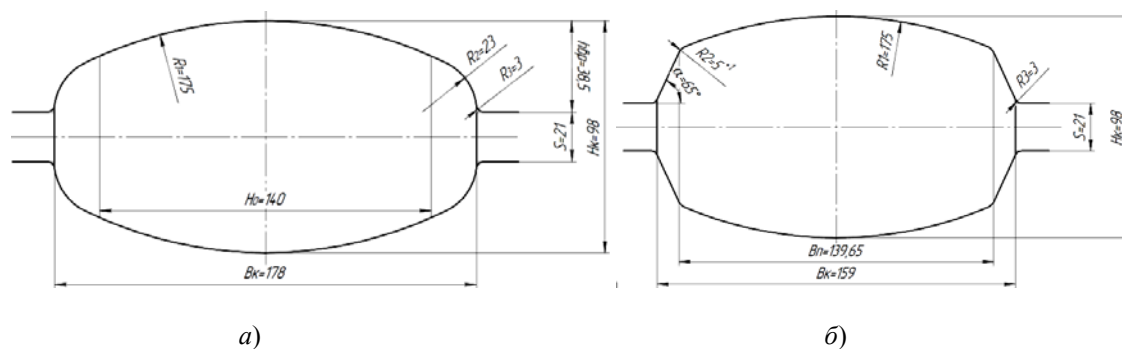


Рис. 2. Геометрия калибра валка в клети № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант

Оценка эффективности усовершенствованной геометрии выполнена численным моделированием по МКЭ в программном пакете SimufactForming с наложением на заготовку сетки конечных элементов с размером ячейки 2 мм.

Simufact Forming является универсальной программой компьютерного моделирования для расчета процессов деформирования металлов. Этому способствует адекватность моделей технологического процесса, а также точное описание реологического поведения металла в условиях деформации. В Simufact Forming доступны все инструменты для эффективного моделирования и расчета, независимо от температуры процесса, используемого оборудования или обрабатываемых материалов.

Эффективность усовершенствованного калибра № 1 оценивалась по следующим параметрам:

- 1) захватывающая способность;
- 2) заполнение калибра;
- 3) совместимость полученной геометрии раската с калибром клети № 2 (устойчивость полосы).

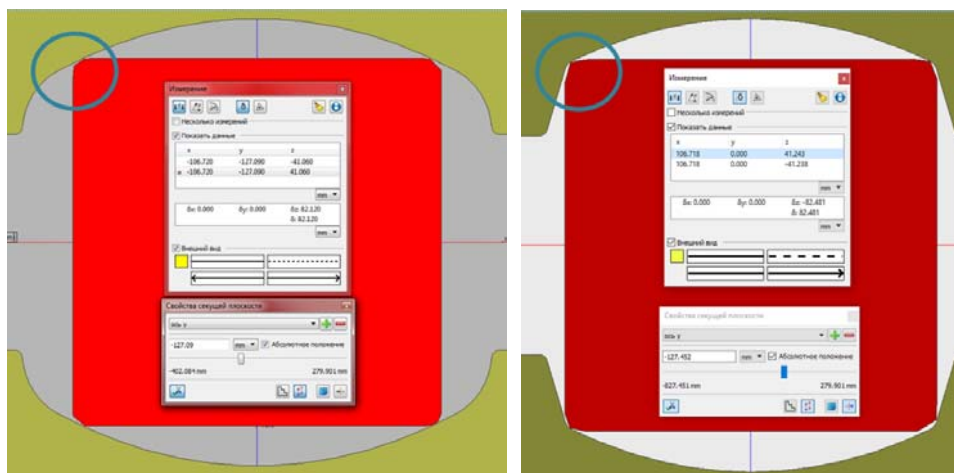
На первом этапе была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом. Исходные данные параметров технологического процесса представлены в таблице. Материал валков в клетях № 1 и 2 – сталь 150ХНМ. Непрерывнолитая заготовка квадратного сечения  $140 \times 140$  мм.

#### Исходные данные численного эксперимента процесса прокатки в клетях № 1, 2

Технологические параметры	Клеть № 1	Клеть № 2
Диаметр валков $D_v$ , мм	560	560
Катающий диаметр валков $D_k$ , мм	497	491
Межвалковый зазор $S$ , мм	21	18
Высота калибра $H$ , мм	98	111
Ширина полосы в калибре $B$ , мм	159	115
Скорость прокатки $v$ , м/с	0,519	0,693
Частота вращения валков $n$ , об/мин	20,098	28,956
Температура полосы на входе в клеть № 1 $T_0$ , °С	1130	–

По результатам численного эксперимента анализировались геометрия очага деформации, заполнение калибра и энергосиловые параметры процесса.

**Оценка захватывающей способности.** Захват в базовом калибре (рис. 3, а) двухточечный, происходит по дуге дна калибра радиусом 175 мм при нестабильном положении полосы. Это ухудшает условия захвата. Контакт полосы на входе в усовершенствованном калибре четырехточечный, происходит по радиусу дна калибра и боковым выпускам с требуемым заземлением полосы (рис. 3, б). При этом геометрия с плоскими выпусками имеет лучшее удаление окалины.

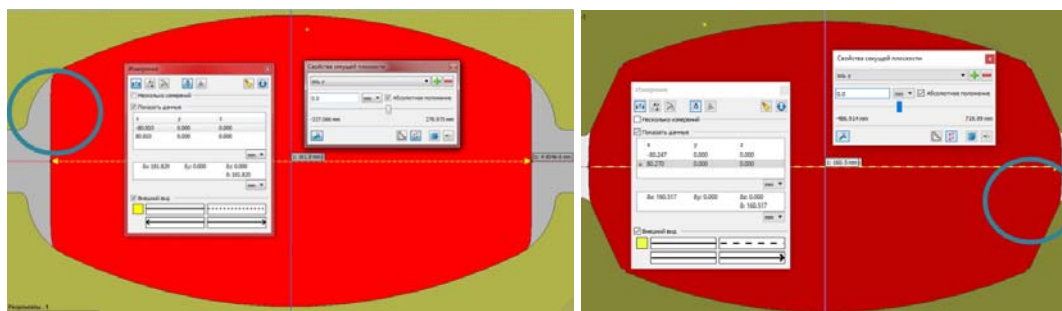


а)

б)

Рис. 3. Сечение на входе в очаг деформации калибра вала клетки № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант

**Оценка заполнения калибра.** Оценка заполнения базового калибра на выходе из очага деформации (рис. 4, а) показывает, что длина «холодного» выпуска, не имеющего контакт с полосой, значительна. Это приводит к возникновению больших термочислических напряжений, а значит и быстрому износу на выпусках калибра. Кроме этого свободное положение полосы в калибре в поперечном направлении из-за последующей кантовки приводит к ее смещению и неравномерной выработке калибра [2]. Усовершенствованный калибр указанных недостатков не имеет, металл в межвалковый зазор не вышел (рис. 4, б).



а)

б)

Рис. 4. Сечение на выходе в очаг деформации калибра вала клетки № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант

### Оценка совместимости полученной геометрии раската с калибром клетки № 2.

При оценке совместимости усовершенствованного калибра оценивалось качество контакта на входе в калибр (рис. 5, а) и заполнение на выходе из очага деформации (рис. 5, б). Захват происходит по четырем точкам с высокой устойчивостью полосы в калибре. Заполнение калибра полное, без холодных выпусков. Следовательно, совместимость усовершенствованного калибра клетки № 1 с последующим № 2 можно считать полной.

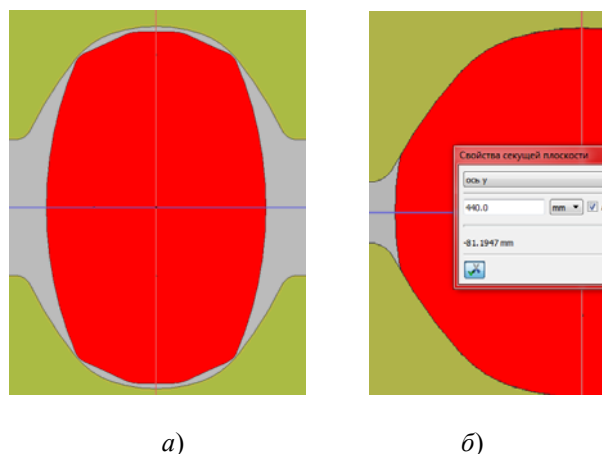


Рис. 5. Форма и геометрия очага деформации в клетки № 1 для 5-го эксперимента:  
а – сечение на входе в очаг деформации; б – сечение на выходе из очага деформации

По результатам численных экспериментов была определена оптимальная геометрия калибра № 1. Ширина калибра позволяет расположить на бочке вала 5 калибров (рис. 6).

Предлагаемая компоновка имеет следующие преимущества:

- увеличение калибра с 4 до 5 позволяет более на 25 % увеличить ресурс вала за счет увеличения возможных переточек;
- увеличение длины буртов между калибрами улучшает температурный режим прогрева выпусков и облегчает переточку, что также приводит к увеличению ресурса вала.

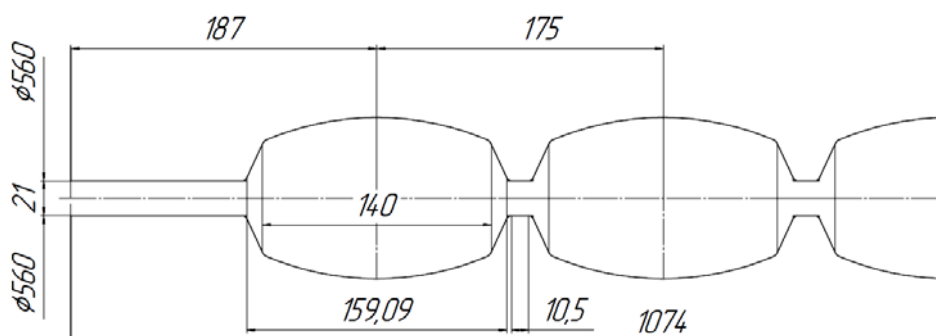


Рис. 6. Предлагаемая компоновка калибров на бочке вала № 1

Усовершенствованный с помощью численного моделирования калибр клетки № 1 успешно внедрен в прокатном производстве на стане 320. Заявленные преимущества калибра были подтверждены в условиях действующего технологического процесса.

#### Литература

1. Стрельченко, А. В. Исследование влияния геометрии ящичных калибров валков на образование термоциклических трещин в условиях мелкосортно-проволочного стана горячей прокатки 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК» / А. В. Стрельченко, И. А. Зуев, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2019. – Т. 75, № 1. – С. 80–86.
2. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9×8 на редуционно-растяжном стане трубoproкатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / М. В. Оборон [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2016. – № 3 (1395). – С. 82–86.

### ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТУРИЗМ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: МАРКЕТИНГОВЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ

Е. Н. Карчевская, Ю. А. Галова, В. А. Сидоркина

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрены промышленный туризм как вид городских исследований, история и основные этапы промышленного туризма, популярные для посещения объекты, стоимость посещения и доходы от промышленного туризма, влияние кинематографа на формирование и развитие промышленного туризма, туристское предложение и перспективы развития промышленного туризма.*

**Ключевые слова:** промышленный туризм, индустриальный туризм, городские исследования.

Актуальность настоящего исследования обусловлена решением Министерства спорта и туризма Республики Беларусь посвятить в 2024 г. каждый месяц одному из 13-ти видов туризма, в число которых входит и промышленный туризм. Для развития различных видов туризма предполагаются мероприятия, включающие образовательные семинары, пресс-конференции, круглые столы, мастер-классы, профориентационные экскурсии, дни «открытых дверей» на предприятиях и другие мероприятия, направленные на популяризацию промышленного туризма [4].

Индустриальный (промышленный) туризм рассматривается как вид городских исследований, а также направление в туристическом бизнесе, включающее в себя промышленные объекты, часто характерные для конкретного места. Формами промышленного туризма являются экскурсии как на постиндустриальные объекты (заброшенные и неработающие), так и на действующие [1].

Историю промышленного туризма принято вести с 1866 г., когда первую экскурсию предложил завод по производству виски Jack Daniel's в США. Рынок промышленного туризма начал формироваться в середине XX в., интенсивный его рост начался с 90-х гг. прошлого века. Первыми направлениями промышленного туризма были винные туры во Францию, посещение сыроваров в Нидерландах. В настоящее время популярными становятся для посещения туристов объекты промышленного наследия и современной промышленности. Со временем появились и международные организации [8, 9].