

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

Галимьянов Ильяс Каримович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ПОВЫШЕННОЙ ОБЪЕМНОЙ
ТВЕРДОСТИ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ШВАРЦ Данил Леонидович

Официальные оппоненты: **УМАНСКИЙ Александр Александрович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет», директор
института металлургии и материаловедения;

ШЕВЧЕНКО Олег Игоревич,
доктор технических наук, доцент,
Нижнетагильский технологический институт
(филиал) ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой
металлургических технологий;

РАДИОНОВА Людмила Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет», доцент кафедры металлургии

Защита состоится «24» мая 2023 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4606>.

Автореферат разослан «__» апреля 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Производство мелющих шаров на российских предприятиях и предприятиях стран СНГ организовано на уровне потребности горнодобывающей отрасли постсоветского формата. С постепенным внедрением на горнообогачительных комбинатах современных агрегатов для измельчения горнорудного сырья повышенной производительности, повышаются требования к технологическим процессам производства мелющих шаров.

Основные тенденции технологических инноваций в этом направлении продиктованы зарубежным опытом. Технологический процесс измельчения пород в шаровых мельницах повышенной производительности вносит повышенные требования к мелющим шарам. С целью выполнения таких требований мелющие шары должны иметь повышенную прочность и износостойкость. Механические свойства регламентируются на поверхности и по сечению мелющих шаров. По ГОСТ 7524-2015 для мелющих шаров 4 группы твердости регламентируется ее уровень твердости на поверхности и на $\frac{1}{2}$ радиуса шара. Мелющие шары 5 группы твердости по ГОСТ 7524-2015, по аналогии с зарубежными требованиями, должны иметь регламентированный уровень твердости на поверхности и в определенных позициях по сечению шара.

С целью производства мелющих шаров 4, 5 групп твердости по ГОСТ 7524-2015 и более высокой твердости в АО «ЕВРАЗ НТМК» введен в эксплуатацию новый шаропрокатный стан. Выполнение повышенных требований обеспечивается путем разработки технологического процесса производства мелющих шаров на оборудовании участка нового шаропрокатного стана рельсобалочного цеха. Разработка технологического процесса включает в себя подбор оптимального химического состава стали, расчет калибровки прокатных валков, выбор режима термической обработки мелющих шаров.

В связи с вышесказанным **актуальной задачей** является исследование напряжённо-деформированного состояния процесса поперечно-винтовой прокатки мелющих шаров и процесса их термообработки на новом шаропрокатном стане с целью разработки технологических режимов производства, обеспечивающих заданный уровень свойств.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время в области обработки металлов давлением наиболее обоснованно и полно выполнено решение краевых задач пластической деформации мелющих шаров путем прокатки на валках с однозаходной расточкой. Менее изученными являются процессы деформации мелющих шаров путем прокатки на валках с двух и более заходной расточкой и процессы термообработки шаров из легированных марок стали.

Изучению процессов производства мелющих шаров посвящены работы А.И. Целикова, В.И. Котенка, С. С. Зозулина, А. П. Сичевой, С.П. Грановского, А.А. Громова, В.И. Ефанова, В.Н. Перетяшко и др. В них рассмотрены вопросы выбора материала, разработки калибровок, используемых на станах поперечно-винтовой прокатки, способы термомеханической обработки.

До настоящего времени вопросы, связанные с процессом поперечно-винтовой прокатки шаров и термообработки шаров из легированных марок сталей в условиях реального производства, разработаны недостаточно. Это позволяет сформулировать цель диссертационной работы.

Целью работы является разработка, исследование и внедрение технологии производства мелющих шаров повышенной прочности на основе физического и компьютерного моделирования процессов прокатки и термомеханической обработки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

□ Осуществить постановку и решение краевой задачи, описывающей напряжённо-деформированное состояние с помощью компьютерного моделирования действующего процесса поперечно-винтовой прокатки шаров.

□ Выполнить анализ действующего промышленного процесса поперечно-винтовой прокатки шаров и термической обработки шаров из легированных марок сталей с целью выявления недостатков и несовершенств технологии;

□ Разработать технологические мероприятия по совершенствованию процесса производства и устранению технологических недостатков.

□ На основании полученных данных разработать компьютерную модель калибровки валков поперечно-винтовой прокатки шаров и термической обработки шаров из легированных марок сталей, адаптированную для условий промышленной прокатки.

□ Произвести внедрение разработанного технологического процесса в реальные условия производства.

Постановка цели и задач настоящей работы соответствует приоритетным направлениям развития УрФУ: «Металлургия» и «Новые материалы и материаловедение».

Научной новизной диссертационной работы обладают следующие результаты:

- новые знания о влиянии параметров калибровки валков шаропрокатного стана на распределение напряжений и деформаций при прокатке мелющих шаров диаметром 100 мм с применением дискрето- и непрерывно-изменяющегося шага нарезки реборд;

- усовершенствованная методика расчета калибровки валков шаропрокатного стана, отличающаяся от известных, новым подходом к определению ширины реборды;

- методика и математическая модель расчета настроечных параметров шаропрокатного стана (расстояние между валками на входе выходе металла, угла расположения валков) в зависимости от диаметра прокатываемого шара;
- модель процесса термомеханической обработки шаров, которая включает в себя: расчет температурных полей в металле после прокатки и в процессе охлаждения перед закалкой, а также компьютерную модель процесса закалки и отпуска мелющих шаров в программных комплексах Deform 3D и JMatPro.

Теоретическую и практическую значимость диссертационной работы представляют следующие разработки:

- компьютерная модель процесса поперечно-винтовой прокатки шаров с непрерывно-изменяющимся шагом реборды, адаптированная к условиям действующего шаропрокатного стана;
- разработанная и внедренная новая калибровка валков с применением непрерывно-изменяющегося шага реборды, обеспечивающая снижение износа рабочих валков, дефектов прокатного происхождения, энергозатрат на прокатку;
- способ расчета межосевого расстояния в точке скрещивания прокатных валков при производстве шаров разного диаметра;
- разработанный и внедренный алгоритм определения рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана для прокатки шаров различных диаметров, как для новых валков, так и для валков после переточки;
- режимы термической обработки, разработанные с помощью компьютерного моделирования и внедренные технологический процесс закалки и отпуска, позволяющие производить шары 5 группы твердости по ГОСТ 7524-2015.

Методология и методы исследования. Методология исследования построена на применении фундаментальных положений теории пластичности и

обработки металлов давлением, при использовании следующих методов: испытания механических свойств металлических материалов, конечно-элементное моделирование, планирование вычислительных и промышленных экспериментов, статистическая обработка опытных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- компьютерная модель прокатки в программном комплексе Deform 3D с использованием калибровки с непрерывно- изменяющимся шагом реборд, показавшая высокую степень сходимости результатов моделирования с результатами опытной прокатки;

- новая калибровка шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом реборд и толщины реборд;

- результаты исследования напряженно-деформированного состояния режимов прокатки мелющих шаров;

- методика и алгоритм расчета межвалкового расстояния в точке скрещивания валков шаропрокатного стана и рациональных настроечных параметров;

- компьютерная модель термической обработки шаров в программных комплексах Deform 3D и JMatPro, которая показала высокую степень сходимости результатов моделирования с результатами промышленного опытного эксперимента;

- результаты внедрения разработанного технологического процесса, обеспечивающего получение шаров повышенной твердости в условиях шаропрокатного участка ШПС РБЦ.

□ **Степень достоверности.** Достоверность подтверждается высокой сходимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными, а также успешным внедрением в производство разработанных режимов прокатки и термической обработки.

Апробация результатов работы выполнена путем докладов итогов исследований на конференциях и публикацией в рецензируемых изданиях, в том числе, зарубежных и входящих в перечень ВАК.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV Международная молодежная научно-техническая конференция (2019 г., МГТУ им Г.И. Носова, г. Магнитогорск), Совместная международная научно-техническая конференция НТИ (филиала) УрФУ и АО «ЕВРАЗ НТМК» «ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ» (2020 г., НТИ УрФУ, г. Нижний Тагил), Международная научно-техническая конференция «Промышленное производство и металлургия» (International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, 2021 г., НТИ УрФУ, г. Нижний Тагил), XIII Конгресс прокатчиков (2022 г, ЦНИИЧермет им. Бардина, Москва).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 научных работах, в том числе 9 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 8 статей в изданиях, входящих в международную базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 155 страницах текста, включает 86 рисунков, 2 таблицы и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 147 наименований и одного приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, дана характеристика её научной новизны и практической значимости.

В **первой главе** представлено описание технических требований к мелющим шарам, анализ литературы по проблематике исследования. Описаны особенности технологического процесса производства мелющих шаров и

методом поперечно-винтовой прокатки. Произведен обзор технологии производства изготовителей мелющих шаров и анализ методик расчета калибровки валков шаропрокатных станов. На основании выполненного обзора, сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** выполнен анализ действующей и разработана новая двухзаходная калибровка прокатных валков шаропрокатных станов для производства мелющих шаров диаметром 100 мм. Произведено компьютерное моделирование в программном комплексе Deform V12.1, для создания геометрии процесса была выбрана CAD-система Solid Works V10.

Для процесса моделирования выполнили позиционирование прокатных валков и исходной заготовки согласно схеме, приведенной на рисунке 1.

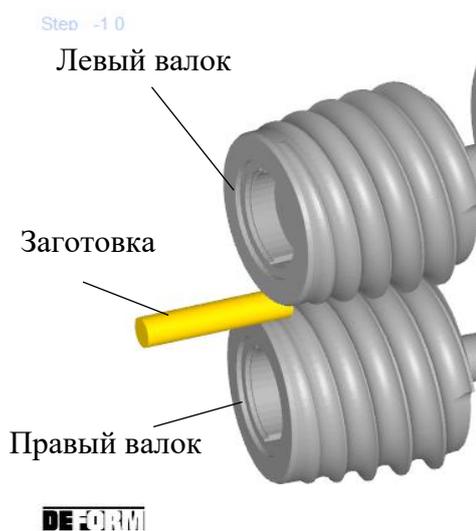


Рисунок 1 – Позиционирование прокатных валков и заготовки

По результатам моделирования (рисунок 2) установлено, что при использовании калибровки валков с дискретно-изменяющимся шагом нарезки реборд:

- в целом имеет место достаточно высокий уровень напряжений по всему объему деформируемого металла;
- в процессе прокатки шаров используется увеличенный вертикальный угол наклона валков при этом имеют место большие значения тангенциальных напряжений;

- в зоне захвата металла валками имеют место повышенные контактные напряжения, что вызывает существенный износ реборды в этой зоне;

- металл, смещаемый из перемычек в шар, приводит к радиальной деформации и увеличению диаметра шара по сравнению с диаметром заготовки. Это вызывает повышенный уровень напряжений на боковой поверхности реборды, что приводит к повышенному износу реборд и образованию в промышленных условиях дефекта наката металла в осевой зоне шара – «шапка».

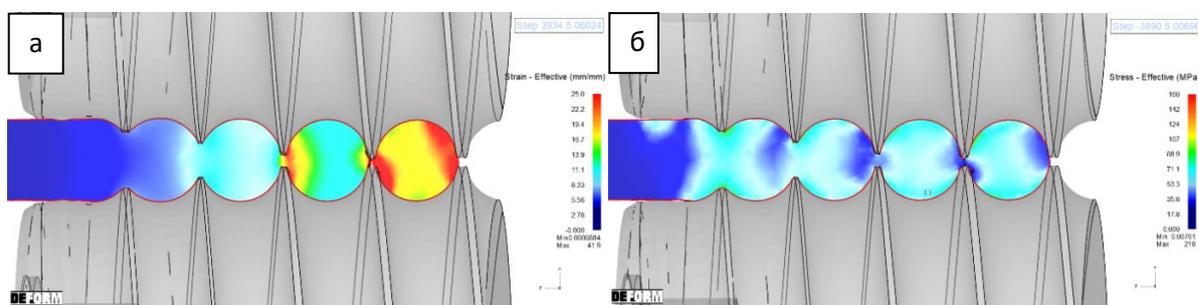


Рисунок 2. – Результаты расчета интенсивности деформаций (а) и интенсивности напряжений (б), возникающих при прокатке шаров диаметром 100 мм.

Действующая калибровка валков шаропркатного стана усовершенствована.

На основании расчетов калибров разработана новая калибровка двухзаходных валков с непрерывно изменяющимся шагом для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм. Методика расчета калибровки валков с непрерывно-изменяющимся шагом отличается новым принципом построения ширины реборд в начале формирующего участка при захвате заготовки с учетом соблюдения условий постоянства объема металла в калибре.

По результатам расчета элементов построен график нарезки калибров (рисунок 3).

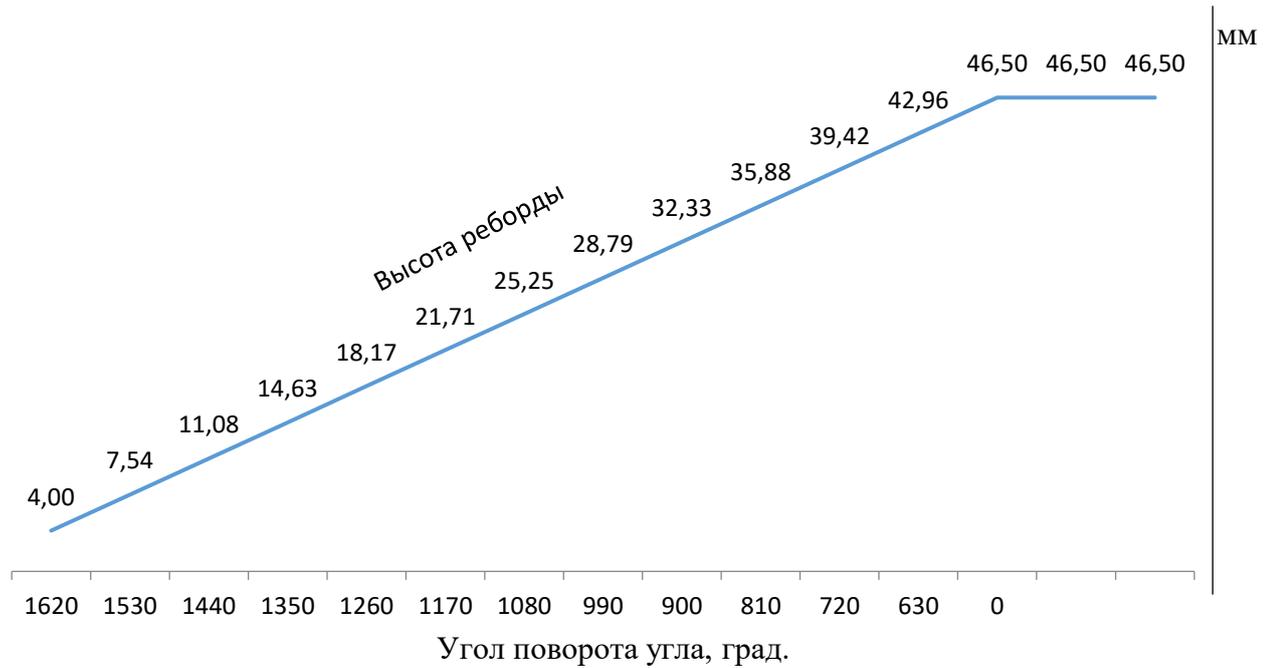


Рисунок 3. – График нарезки калибров

Для разработанной калибровки выполнено компьютерное моделирование, результаты которого представлены ниже.

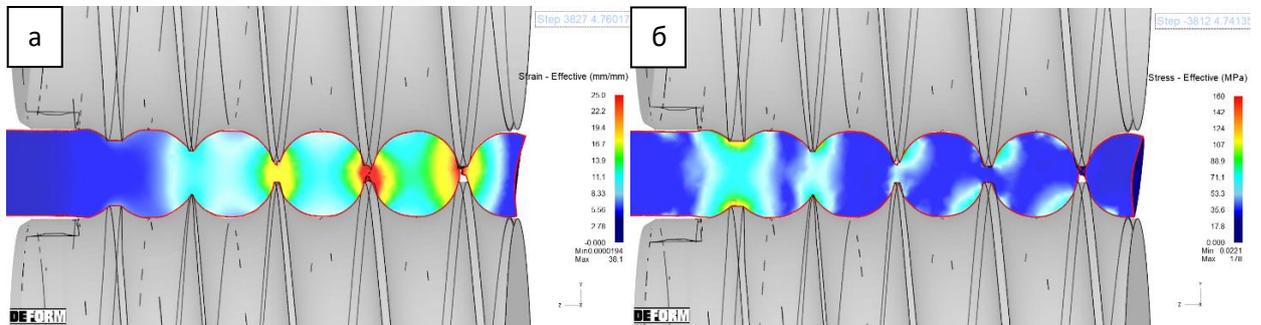


Рисунок 4. Результаты расчета интенсивности деформаций (а) и интенсивности напряжений (б), возникающих при прокатке шаров диаметром 100 мм.

По результатам моделирования новой калибровки двухзаходных валков с непрерывно-изменяющимся шагом для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм установлено:

- уровень напряжений по всему объему деформируемого металла снижается;

- подобранный в ходе моделирования вертикальный угол наклона валков в 3,5 градуса, снижает тангенциальные напряжения;

- снижение напряжений по сравнению с действующей калибровкой подтверждает эффективность калибровки с непрерывно-изменяющимся шагом ввиду наличия эффекта растяжения в осевой зоне при отделении «половинки».

- снижение уровня напряжений на боковой поверхности реборды, что приводит к уменьшению износа реборд и исключению образования дефекта наката металла на шаре – «шапка».

По разработанной модели изготовлены рабочие валки шаропрокатного стана. Прокатана опытная партия шаров. Результаты опытной прокатки подтвердили выводы теоретического исследования.

Разработанная калибровка опробована в условиях шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК». Прокатана опытная партия шаров диаметром 100 мм из легированной марки стали 65С2Х. Объем партии- 2000т.

Получены следующие результаты прокатки опытной партии:

- форма, геометрические размеры и качество поверхности шаров соответствуют требованиям ГОСТ;

- применен питающий угол валков 3,5 град, что привело к снижению тангенциальных нагрузок, и как следствие к снижению износа рабочих калибров и исключению образования дефектов поверхности;

- разработанная новая калибровка валков в совокупности с примененными настроечными параметрами позволили снизить нагрузку на электродвигатель прокатного стана на 10-15 %, т.е. повысить энергоэффективность процесса прокатки шаров.

Третья глава сфокусирована на анализе настроечных параметров при прокатке мелющих шаров на шаропрокатном стане.

При проектировании процесса прокатки шаров, основными параметрами как для расчета калибровки, так и для построения модели вала, являются: диаметр и длина бочки рабочих валков, положение точки скрещивания (зоны где реборды валков находятся на максимально близком расстоянии друг от

друга – там, где происходит отделение шара), а также межвалковое расстояние в точке скрещивания.

Точка скрещивания (рисунок 5 и 6) определяется расположением опорной части кассеты (стринги) и может изменяться на 5-10 мм, в зависимости от смещения, «осевого» люфта на кассетах. Учитывая принятые допущения, принимаем, что осевое смещение составляет «0» мм.

Таким образом, требуется определить межвалковое расстояние в точке скрещивания T , в зависимости от шести величин: C_l , C_p , D_l , D_p , L и A (здесь L – длина бочки валков, A – теоретическое межосевое расстояние).

Рассмотрим горизонтальную проекцию валков (см. рисунок 6) и определим углы α_l (угол горизонтального разведения левого валка) и α_p (угол горизонтального разведения правого валка):

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{D_i - C_i}{L}\right), \quad (1)$$

где индекс i принимает значения л и п.

Межвалковое расстояние в точке скрещивания определяется суммой расстояний от оси прокатки до левого и правого валков

$$T = t_l + t_p. \quad (2)$$

С учетом выражения (3.1) расстояния от оси прокатки до левого и правого валков связано с положением точки скрещивания выражением

$$t_i = \frac{A}{2} - C_i - (L - L_k) \left(\frac{D_i - C_i}{L}\right), \quad (3)$$

где L_k – расстояние от выхода валка до точки скрещивания.

При переточках валков будет изменяться межосевое расстояние A , поэтому, формула (3) примет следующий вид

$$t_i = \frac{A - K}{2} - C_i - (L - L_k) \left(\frac{D_i - C_i}{L}\right), \quad (4)$$

где K – величина удаленного слоя металла при переточке валков.

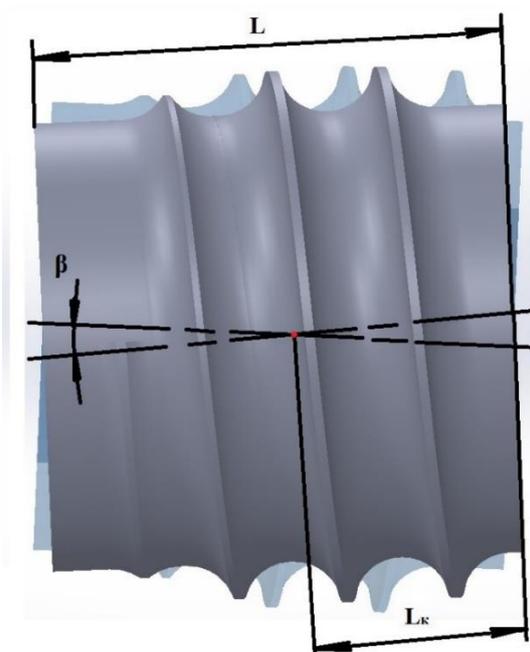


Рисунок 5 – Точка скрещивания валков (фронтальный вид валков)

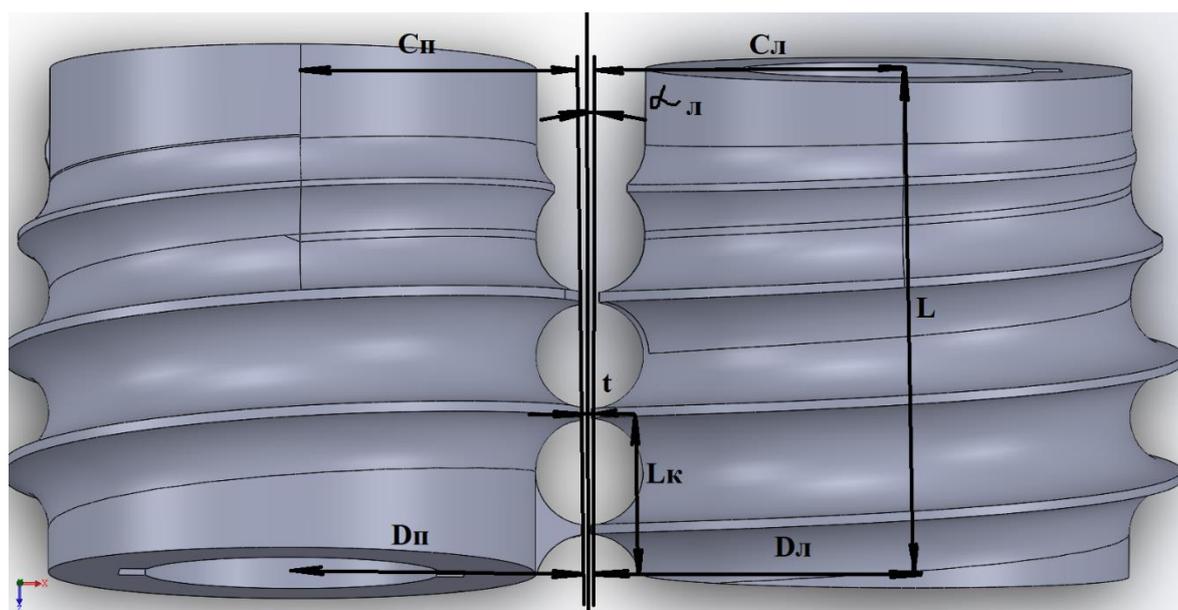


Рисунок 6 – Точка скрещивания валков (вид валков сверху)

Используя базу оперативных данных по настройке шаропрокатного стана, можно определить рациональные настроечные параметры стана после перевалки. Кроме того, накопленные данные, позволяют разработать математическую модель расчета рациональных настроечных параметров, адаптируемую под постоянное обучение, при пополнении базы. С учетом постоянного накопления данных модель может быть самообучающейся

На основании рациональных значений настроечных параметров, при которых получаются удовлетворительные показатели формы и размеров шаров построены графики зависимости расстояния валков до оси прокатки (рисунок 7) и угла расположения валков (рисунок 8) от диаметра шара.

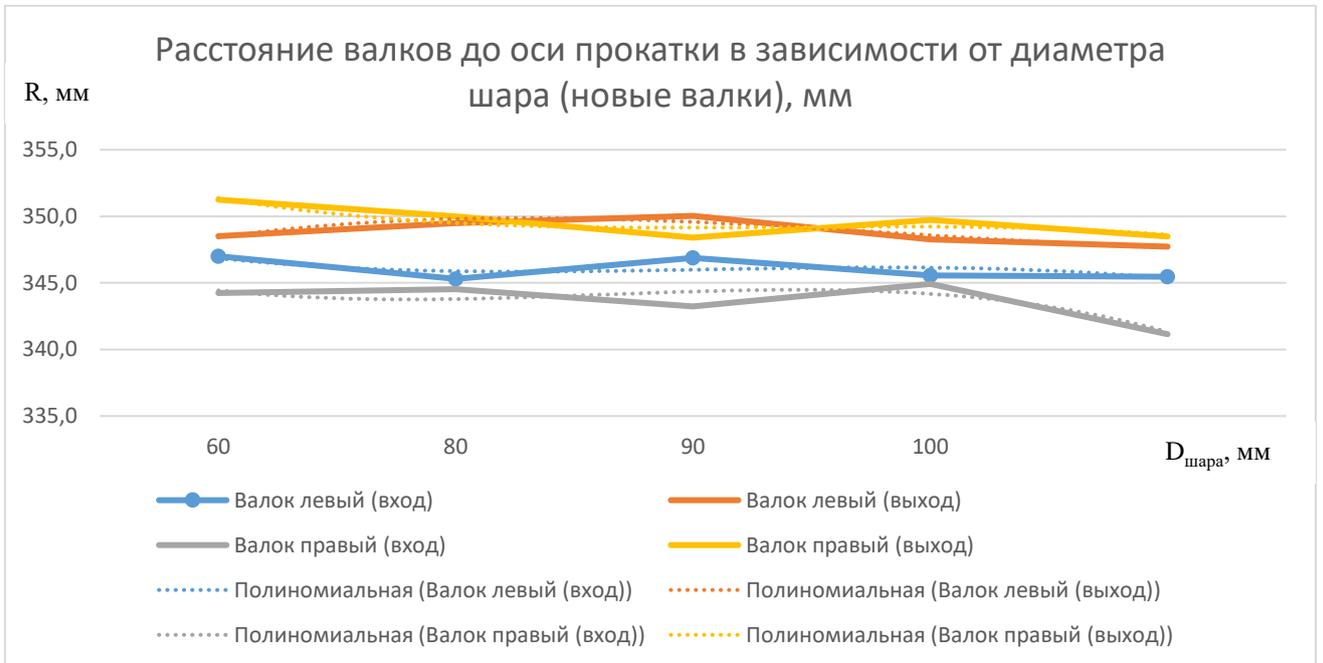


Рисунок 7 – График настроечных параметров на новых валках,
R – расстояние валков от оси прокатки, $D_{\text{шара}}$ – диаметр шара

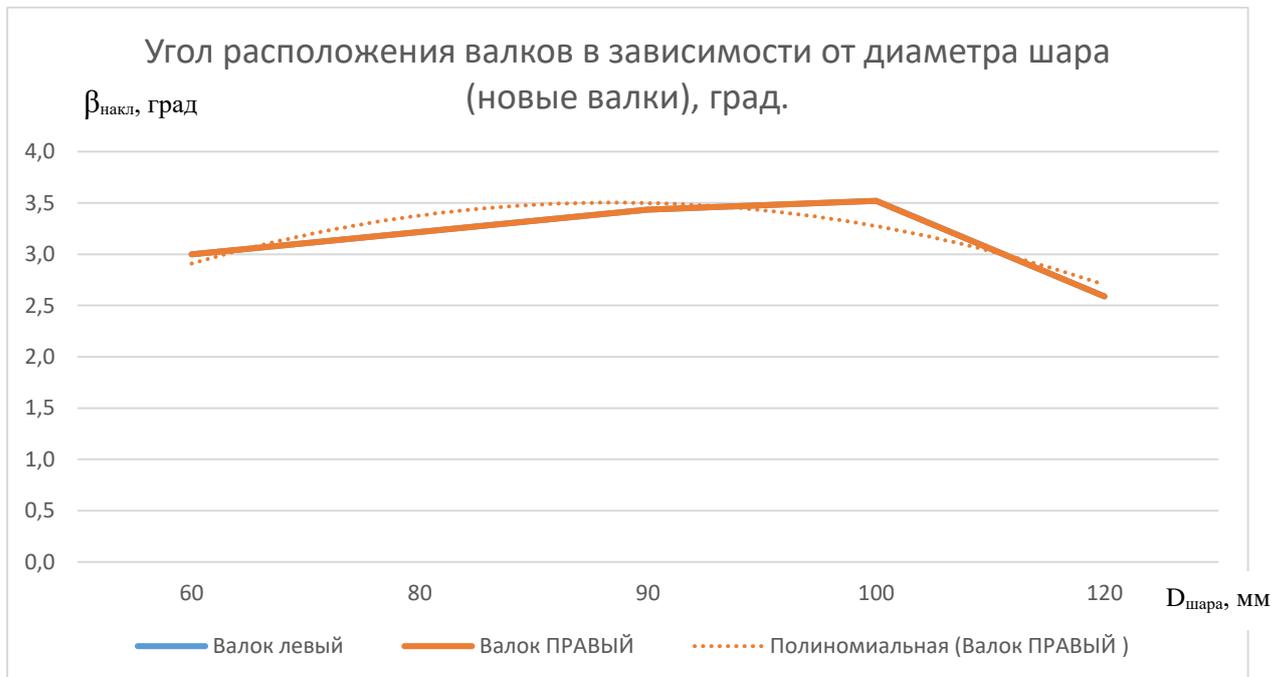


Рисунок 8 – График угла расположения новых валков
 $\beta_{\text{накл}}$ – угол наклона расположения левого и правого валков

Разработан алгоритм расчета межвалкового расстояния в точке скрещивания валков шаропрокатного стана.

Проведен анализ настроечных параметров прокатных валков с винтовыми калибрами при прокатке мелющих шаров диаметром 60 мм, 80 мм, 90 мм, 100 мм, 120 мм по ГОСТ 7524-2015. По результатам анализа определены рациональные настроечные параметры, гарантирующие производство шаров с удовлетворительными показателями формы и размеров, качества поверхности, а также исключаящие недопустимые дефекты.

На основе систематизированных данных о рациональных настройках шаропрокатного стана получены уравнения для расчета настроечных параметров прокатки, как для новых валков, так и для валков после переточки (см. таблицу).

Полученные уравнения позволяют определить рациональные настроечные параметры шаропрокатного стана при освоении новой номенклатуры шаров.

Таблица – Уравнения, для расчета настроечных параметров шаропрокатного стана

	Настроечный параметр		Уравнения функций настроечных параметров
Новые валки	Расстояние от оси прокатки до оси валков	Правый (вход)	$C_{\text{п}} = -0,3231 d^3 + 2,5416 d^2 - 6,0096 d + 348,23$
		Правый (выход)	$D_{\text{п}} = -0,1831 d^3 + 1,86 d^2 - 6,1722 d + 355,87$
		Левый (вход)	$C_{\text{л}} = -0,1709 d^3 + 1,5627 d^2 - 4,4612 d + 349,92$
		Левый (выход)	$D_{\text{л}} = 0,1403 d^3 - 1,6473 d^2 + 5,3419 d + 344,59$
	Угол расположения валков		$\beta = -0,0849 d^3 + 0,5903 d^2 - 1,0146 d + 3,5199$
1 переточка	Расстояние от оси прокатки до оси валков	Правый (вход)	$C_{\text{п}} = 1,9517 d^3 - 15,935 d^2 + 37,08 d + 312,87$
		Правый (выход)	$D_{\text{п}} = 2,085 d^3 - 17,835 d^2 + 44,647 d + 310,59$
		Левый (вход)	$C_{\text{л}} = -0,0517 d^3 + 2,2917 d^2 - 13,723 d + 358,43$
		Левый (выход)	$D_{\text{л}} = 0,495 d^3 - 2,6345 d^2 - 0,3629 d + 349,9$
	Угол расположения валков		$\beta = -0,0983 d^3 + 0,7464 d^2 - 1,5552 d + 3,948$
2 переточка	Расстояние от оси прокатки до оси валков	Правый (вход)	$C_{\text{п}} = 0,5385 d^3 - 4,3558 d^2 + 10,931 d + 319,41$
		Правый (выход)	$D_{\text{п}} = 0,4 d^3 - 3,0714 d^2 + 8,0786 d + 326,92$

Таблица (продолжение)

		Левый (вход)	$C_{л} = 1,2729 d^3 - 9,9098 d^2 + 18,467 d + 333,8$
		Левый (выход)	$D_{л} = 1,4042 d^3 - 10,966 d^2 + 20,53 d + 335,38$
	Угол расположения валков		$\beta = 0,5385 d^3 - 4,3558 d^2 + 10,931 d + 319,41$
3 переточка	Расстояние от оси прокатки до оси валков	Правый (вход)	$C_{п} = -0,6042 d^3 + 6,6613 d^2 - 21,801 d + 344,86$
		Правый (выход)	$D_{п} = -0,9903 d^3 + 11,034 d^2 - 36,442 d + 366,09$
		Левый (вход)	$C_{л} = 1,0833 d^3 - 8,0798 d^2 + 15,62 d + 321,61$
		Левый (выход)	$D_{л} = 1,3111 d^3 - 10,098 d^2 + 21,041 d + 318,05$
	Угол расположения валков		$\beta = -0,1611 d^3 + 1,3155 d^2 - 3,0234 d + 4,8767$
4 переточка	Расстояние от оси прокатки до оси валков	Правый (вход)	$C_{п} = -1,4375 d + 326,56$
		Правый (выход)	$D_{п} = 0,3125 d + 327,79$
		Левый (вход)	$C_{л} = -1,9875 d + 330,06$
		Левый (выход)	$D_{л} = 1,1125 d + 327,56$
	Угол расположения валков		$\beta = -1,4375 d + 326,56$

В четвертой главе представлены результаты разработки, исследования и внедрение технологии термомеханической обработки мелющих шаров при помощи компьютерного и физического моделирования.

Исследование неравномерности распределения температур по сечению и поверхности шара после прокатки по новой калибровке выполнено с помощью пакета Deform (рисунок 9). Эти результаты явились исходными данными для моделирования процессов термомеханической обработки шаров.

Как показали результаты фактических замеров температурных полей на поверхности шара диаметром 100 мм, непосредственно после прокатки выявляется существенное повышение температуры от пояска к полюсам с 946 до 1025 °С, существенно зависящее от условий деформации заготовки в прокатных валках, что сопоставимо с результатами моделирования температурного распределения в программном комплексе Deform и подтверждает адекватность компьютерной модели.

С помощью программного комплекса SOLID FLOW SIMULATION проведено исследование выравнивания температуры шаров после прокатки для

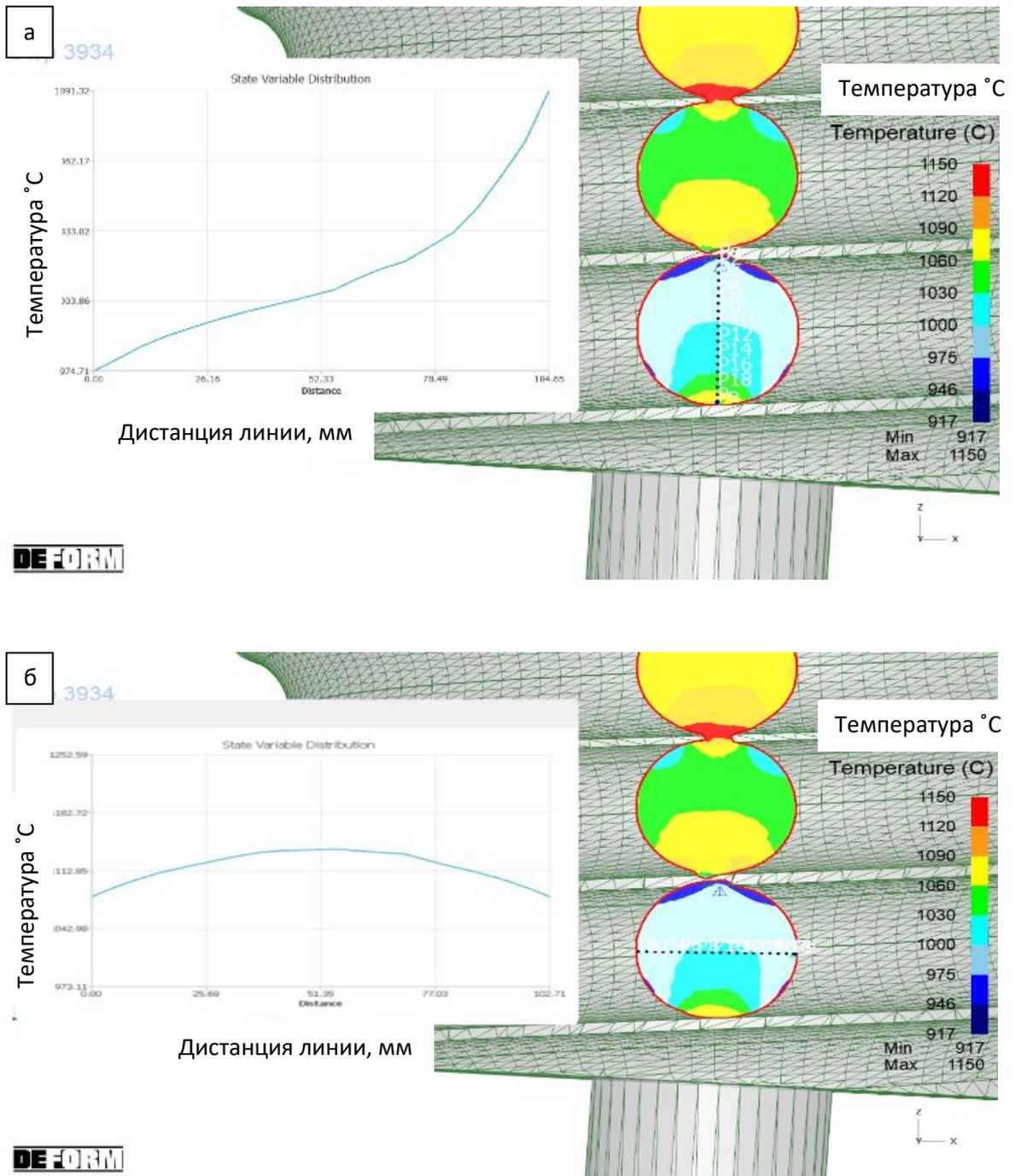


Рисунок 9. – Распределение температуры по сечению шара в конце прокатки а) вдоль оси проката, б) перпендикулярно оси проката

моделирования распределения температуры по сечению шара перед закалкой.

Сопоставив результаты физического и компьютерного моделирования процесса охлаждения шара после прокатки распределение температуры по сечению шара диаметром 100 мм на 150 секунде охлаждения перед процессом закалки происходит в диапазоне от 835 до 740 °C (от центра к поверхности).

На основе взаимодействия программных пакетов JMatPro и DEFORM построена компьютерная модель процесса закалки, которая позволяет оценивать фазовый состав и твердость мелющего шара после термической обработки. Моделирование процесса закалки шара диаметром 100 мм из стали марки 65С2Х показало, что при всех возможных разбросах химического состава исходной заготовки, твердость поверхности шаров, мелющих составит не менее 57 HRC, а объемная твердость не менее 46 HRC, что удовлетворяет требованиям 5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015. Построенная модель процесса термомеханической обработки позволяет учитывать неравномерность распределения температур по сечению шара после процесса прокатки на шаропрокатном стане.

На основании построенной модели разработана технология производства мелющих шаров из стали марок 70ХГС, 60ГР, 65С2Х. С целью отработки производства опытной партии и отгрузки потребителю мелющих шаров повышенной прочности проведена опытно - промышленная работа. Произведена опытно – промышленная партия шаров, по результатам аттестации которых, имеется подтверждение на соответствие техническим требованиям 4 и 5 групп твердости по ГОСТ 7524-2015. По согласованию опытно-промышленные партии направлены потребителю. По результатам использования мелющих шаров 5- ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015 потребитель получил улучшенные результаты по удельному расходу шаров и увеличил объем поставок.

Таким образом впервые с применением программных комплексов JMatPro и DEFORM произведено компьютерное моделирование процесса термической обработки мелющих шаров с целью получения технических показателей в соответствии с требованиями потребителя. Полученная модель позволяет разработать режимы технологического процесса закалки и отпуска с целью получения мелющих шаров повышенной прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решены поставленные задачи и достигнута цель по исследованию, совершенствованию и внедрению рациональных технологических режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров с повышенной объемной твердостью на основе физического и компьютерного моделирования.

1. Выполнена постановка задачи по моделированию процесса прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм по калибровке валков, действующей в условиях шаропркатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК». Сравнение результатов моделирования формоизменения с размерами шаров и «половинок» фактически полученных на стане, свидетельствует об адекватности созданной модели процесса поперечно-винтовой прокатки шаров.

По результатам моделирования установлено, что при использовании калибровки валков с дискретно-изменяющимся шагом нарезки реборд имеет место достаточно высокий уровень напряжений по всему объему деформируемого металла.

В зоне захвата металла валками имеют место повышенные контактные напряжения, что вызывает существенный износ реборды в этой зоне. Металл, смещаемый из перемычек в шар, приводит к радиальной деформации и увеличению диаметра шара по сравнению с диаметром заготовки. Это вызывает повышенный уровень напряжений на боковой поверхности реборды, что приводит к повышенному износу реборд и образованию в промышленных условиях дефекта наката металла в осевой зоне шара – «шапка». Действующая калибровка валков шаропркатного стана может быть усовершенствована.

2 Произведен расчет калибровки прокатных валков шаропркатного стана для производства шаров 100 мм. Разработана новая калибровка двухзаходных валков с непрерывно-изменяющимся шагом для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм. Методика расчета калибровки валков с непрерывно-изменяющимся шагом отличается новым принципом построения

ширины реборд в начале формующего участка при захвате заготовки с учетом соблюдения условий постоянства объема металла в калибре.

3 Проведено моделирование процесса прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм по новой калибровке валков. По результатам моделирования установлено:

- уровень напряжений по всему объему деформируемого металла снижается;

- используемый в процессе прокатки шаров вертикальный угол наклона валков в 3,5 градуса, снижает тангенциальные напряжения, что приводит к снижению износа реборд и исключению образования дефекта наката металла в осевой зоне шара – «шапка»;

- снижение напряжений по сравнению с действующей калибровкой подтверждает эффективность калибровки с непрерывно-изменяющимся шагом ввиду наличия эффекта растяжения в осевой зоне при отделении «половинки».

4 По разработанной модели изготовлены рабочие валки шаропрокатного стана. Прокатана опытная партия шаров. Результаты опытной прокатки подтвердили выводы теоретического исследования.

Разработанная калибровка опробована в условиях шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК». Прокатана опытная партия шаров диаметром 100 мм из легированной марки стали 65С2Х. Объем партии- 2000т.

Получены следующие результаты прокатки опытной партии:

- форма, геометрические размеры и качество поверхности шаров соответствуют требованиям;

- применение питающего угла в 3,5 град привело к фактическому снижению износа рабочих калибров и исключению образования дефектов поверхности;

- разработанная новая калибровка валков в совокупности с примененными настроечными параметрами позволила снизить нагрузку на электродвигатель прокатного стана на 10-15 %, т.е. повысить энергоэффективность процесса прокатки шаров.

5. Разработан алгоритм расчета межвалкового расстояния в точке скрещивания валков шаропрокатного стана. Проведен анализ настроечных параметров прокатных валков с винтовыми калибрами при прокатке мелющих шаров диаметром 60 мм, 80 мм, 90 мм, 100 мм, 120 мм по ГОСТ 7524-2015. По результатам анализа определены рациональные настроечные параметры, гарантирующие производство шаров с удовлетворительными показателями формы и размеров, качества поверхности, а также исключаящие недопустимые дефекты.

На основе систематизированных данных о рациональных настройках шаропрокатного стана получены уравнения для настроечных параметров прокатки, как для новых валков, так и для валков после переточки. Полученные уравнения позволяют определить рациональные настроечные параметры шаропрокатного стана при освоении новой номенклатуры шаров.

6 На основе взаимодействия программных пакетов JMatPro и DEFORM построена компьютерная модель процесса закалки и отпуска шаров, которая позволяет оценивать фазовый состав и твердость мелющего шара после термической обработки. Моделирование процесса закалки шара диаметром 100 мм из стали марки 65С2Х показало, что при всех возможных разбросах химического состава исходной заготовки, твердость поверхности шаров, мелющих составит не менее 57 HRC, а объемная твердость не менее 46 HRC, что удовлетворяет требованиям 5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015. Построенная модель процесса термомеханической обработки позволяет учитывать неравномерность распределения температур по сечению шара после процесса прокатки на шаропрокатном стане.

На основании построенной модели разработана технология производства мелющих шаров из стали марок 70ХГС, 60ГР, 65С2Х. Произведена опытно – промышленная партия шаров, по результатам аттестации которых, подтверждено их соответствие техническим требованиям 4 и 5 групп твердости по ГОСТ 7524-2015.

Перспективой дальнейшей разработки темы является:

- исследование новых материалов для изготовления мелющих шаров с целью увеличения эксплуатационных свойств;
- развитие теории и методик калибровки шаропрокатных валков с переменными параметрами;
- нахождение рациональных решений и разработка режимов термической обработки мелющих шаров из перспективных марок стали с целью повышения износостойкости и снижения себестоимости.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ

ДИССЕРТАЦИИ

статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Shvartc D., **Galimyanov I.** Analysis of double-threaded rolling in the production of grinding balls with a diameter of 100 mm from alloyed steel grades. Сборник: AIP Conference Proceedings. 16. Сер. "Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, ICIMM 2021" 2022. p. 020011, 0,37 п.л./0,19 п.л. (**Scopus**).

2. Shvarts D.L., **Galimyanov I.K.**, Semenov A.A. Computer Simulation of Double-Threaded Rolling in Production of Grinding Balls with a Diameter of 100 mm from Alloy Steels. Metallurgist. 2022. Vol. 66(1-2), pp. 96–103, 0,37п.л./0,12п.л. (**Scopus**).

Шварц Д.Л., Семенов А.А., Галимьянов И.К. Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей. Metallurg. 2022. № 1. С. 79-84, 0,37п.л./0,12 п.л.

3. Shvarts D.L., **Galimyanov I.K.** Improvment of a Double-Helical Roll Pass Design for Rolling 100-mm Grinding Balls. Metallurgist. 2022. Vol. 66(3-4), pp. 422–432, 0,75 п.л./ 0,37 п.л (**Scopus**).

Шварц Д.Л., Галимьянов И.К. Совершенствование двухзаходной калибровки валков для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм. Metallurg. 2022. № 4. С. 60-65, 0,37 п.л./0,19 п.л.

4. Shvarts D.L., **Galimyanov I.K.**, Semenov A.A. Computer simulation of double-threaded rolling in the production of grinding balls with a diameter of 100 mm from alloyed steel grades. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66(5-6), pp. 704–710, 0,43 п.л/0,14 п.л (**Scopus**).

Шварц Д.Л., Галимьянов И.К., Семенов А.А. Компьютерное моделирование новой калибровки шаропрокатных валков двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей. *Металлург*. 2022. № 6. С. 80-84, 0,31 п.л/0,10 п.л.

5. Шварц Д.Л., **Галимьянов И.К.**, Рубцов В.Ю. Анализ настроечных параметров шаропрокатного стана при прокатке мелющих шаров. *Технология металлов*. 2022. № 8. С. 56-64, 1,5 п.л/0,5 п.л.

6. Sidorov A.A., Semenov A.A., Lanovenko I.E., **Galimyanov I.K.**, Il'inykh R.A., Bespamyatnykh A.Y. Computer simulation of the thermal processing of grinding balls, *Metallurgist*. 2021. Vol. 65 (7-8). pp. 722-734, 0,69 п.л/0,11 п.л. (**Scopus**).

Сидоров А.А., Семенов А.А., Лановенко И.Э., Галимьянов И.К., Ильиных Р.А., Беспамятных А.Ю. Компьютерное моделирование процесса термической обработки мелющих шаров. *Металлург*. 2021. № 7. С. 35-43, 0,56 п.л/0,09 п.л.

7. **Galimyanov I.** Analysis of single- and double-threaded rolling for production of grinding ball of alloy steel grades. В сборнике: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 15. Сер. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy" 2020. С. 012009, 0,37 п.л/0,37 п.л. (**Scopus**).

8. Shvedov K.N., **Galimyanov I.K.**, Kazakovtsev M.A. Production of grinding balls of high surface and normalized volume hardness. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64(5-6). pp. 499-507, 0,56 п.л/0,19 п.л. (**Scopus**).

Шведов К.Н., Галимьянов И.К., Казаковцев М.А. Получение мелющих шаров с высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью. *Металлург*. 2020. № 6. С. 16-22, 0,43 п.л/0,14 п.л.

9. **Galimyanov I.K.** The effect of temperature and structure of a round billet on the split behavior of grinding balls. *Chernye Metally* this link is disabled, 2019, 2019(10), pp. 63–66, 0,25 п.л/0,25 п.л. (**Scopus**).

Галимьянов И.К. Влияние температуры и структуры круглой заготовки на раскол мелющих шаров. *Черные металлы*. 2019. № 10. С. 63, 0,25 п.л/0,25 п.л.

Другие публикации:

10. **Галимьянов И.К.** Влияние температуры и структуры круглой заготовки на макроструктуру и раскол мелющих шаров В книге: *MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019*. Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции. Под редакцией А.Г. Корчунова. 2019. С. 46-52, 0,43 п.л/0,43 п.л.

11. Shvedov K.N., Rubtsov V.Yu., **Galimyanov I.K.**, Lanovenko I.J. Product tracking system of the metals route in the ball rolling mill at rail and beam shop. *Калибровочное бюро*. 2022. № 20. С. 26-32, 0,44 п.л/0,11 п.л.

12. Лановенко И.Э., Рубцов В.Ю., Шведов К.Н., **Галимьянов И.К.** Способы испытания мелющих шаров на ударную стойкость. *Калибровочное бюро*. 2021. № 19. С. 22-27, 0,37 п.л/0,09 п.л.

Патенты:

13. Способ производства мелющих шаров из стали: пат RU 2785665 С1 / Шведов К.Н, Казаковцев М.А., Рубцов В.Ю., **Галимьянов И.К.**, Щелоков М.Н., Соколов К.Е., Шкабара А.В. ; заявитель и патентообладатель АО ЕВРАЗ НТМК - № [2022103210](#) ; заявл.09.02.2022 ; опубл. 12.12.2022, Бюл. №35. – 8с; 0,06 п.л. / 0,009 п.л.

Галимьянов Ильяс Каримович

Исследование и совершенствование технологии производства мелющих шаров повышенной объемной твердости на основе физического и компьютерного моделирования

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать ____ .04.2023. Заказ № _____

Формат 60x90/16. Усл.печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография АО «ЕВРАЗ НТМК»