

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт новых материалов и технологий

Кафедра обработки металлов давлением

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Шварц Данил Леонидович

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1. Назначение и технические требования к мелющим шарам.....	11
1.2. Состав оборудования и описание технологического процесса производства шаров в условиях АО «ЕВРАЗ НТМК»	15
1.2.1 Комплекс по производству шаров АО «ЕВРАЗ НТМК».....	15
1.2.2 Описание технологического процесса производства шаров.....	16
1.2.3 Проблемы технологического процесса прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров.....	21
1.3. Обзор технологии производства изготовителей мелющих шаров.....	25
1.4 Литературный обзор исследований в области производства стальных мелющих шаров.....	30
1.4.1 Литературный обзор исследований в области прокатки стальных мелющих шаров.....	30
1.4.2 Литературный обзор исследований в области термомеханической обработки стальных мелющих шаров.....	35
1.5 Анализ существующих методик расчета калибровки прокатных валков шаропрокатных станов.....	37
1.6 Выводы, постановка цели и задач исследования.....	53
2 ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОПЕРЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ.....	57
2.1 Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных марок стали.....	57
2.2 Совершенствование калибровки валков для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм.....	71
2.3 Компьютерное моделирование новой калибровки двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных марок стали.....	73

2.4	Опробование результатов внедрения новой калибровки двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм.....	83
2.5	Выводы.....	85
3	АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ НА ШАРОПРОКАТНОМ СТАНЕ.....	88
3.1	Определение межосевого расстояния в точке скрещивания прокатных валков.....	90
3.2	Определение рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана.....	92
3.3.	Разработка математической модели настроечных параметров.....	95
3.4.	Выводы.....	102
4	ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ	101
4.1	Моделирование распределения температуры по сечению шара после прокатки.....	103
4.2	Определение неравномерности распределения температурного поля шара перед закалкой.....	106
4.3	Исследование процесса термомеханической обработки шаров повышенной твердости.....	109
4.4	Исследование процесса термомеханической обработки мелющих шаров из легированных марок стали.....	125
4.5	Выводы.....	131
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ Использование результатов диссертационной работы в условиях производства.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

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 объемную твердость 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 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. Перетягько 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 объемной твердости на основе физического и компьютерного моделирования процессов термомеханической обработки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Осуществить постановку и решение краевой задачи по определению напряжённо-деформированного состояния с помощью компьютерного моделирования действующего процесса поперечно-винтовой прокатки шаров.
- Выполнить анализ действующего промышленного процесса поперечно-винтовой прокатки 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 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».

Научная новизна диссертационной работы. Получены новые знания о влиянии параметров калибровки валков шаропрокатного стана на распределение напряжений и деформаций при прокатке мелющих шаров диаметром 100 мм.

Установлено, что при использовании калибровки валков с дискретно-изменяющимся шагом нарезки реборд имеет место:

- высокий уровень напряжений по всему объему деформируемого металла;
- повышенные контактные напряжения в зоне захвата металла валками, что вызывает существенный износ реборды в этой зоне;
- смещение металла из перемычек в шар и увеличение диаметра шара по сравнению с диаметром заготовки. Это вызывает повышенный уровень напряжений на боковой поверхности реборды, что приводит к повышенному износу и образованию дефекта наката металла на поверхности шара.

При использовании калибровки валков с непрерывно-изменяющимся шагом:

- увеличение ширины реборды на входе в формующий участок валков снижает износ реборд в месте захвата заготовки;
- уменьшаются напряжения при деформировании металла в прокатных валках шаропрокатного стана;
- при уменьшении вертикального наклона валков снижаются тангенциальные напряжения;
- тангенциальные напряжения влияют на износ боковых поверхностей реборд;

- происходит улучшение отделения шаров друг от друга в зоне отделения (а также «половинок») и уменьшение напряжений из-за возникновения эффекта растяжения;
- уменьшение напряжений приводит к уменьшению износа боковой поверхности реборд и исключению образования дефекта наката металла на шаре.

На основании анализа рациональных процессов прокатки шаров:

- разработана методика и математическая модель расчета настроечных параметров шаропрокатного стана;
- расчетным путем определено межосевое расстояние в точке скрещивания прокатных валков, где происходит отделение шара друг от друга;
- определены зависимости настроечных параметров (расстояние между валками на входе выходе металла, угла расположения валков) от диаметра прокатываемого шара.

Разработана модель процесса термомеханической обработки шаров, которая включает в себя:

- расчет распределения температурных полей в металле после прокатки и в процессе охлаждения перед закалкой;
- компьютерное моделирование процесса охлаждения с целью определения распределения температуры по сечению шара перед закалкой;
- впервые произведено компьютерное моделирование процесса термической обработки мелющих шаров повышенной твердости в программном комплексе Deform 3D с использованием модуля JMatPro.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы определяется разработанными, на основе физического и математического моделирования, и внедренными в производство техническими и технологическими решениями. А именно:

- проведено компьютерное моделирование действующей калибровки с применением дискретно- изменяющегося шага реборды, выявлены недостатки процесса прокатки на шаропрокатном стане;
- разработана и внедрена новая калибровка валков с применением непрерывно- изменяющегося шага реборды;
- разработан алгоритм расчета межосевого расстояния в точке скрещивания прокатных валков при производстве шаров разного диаметра;
- новая калибровка валков в совокупности с примененными настроечными параметрами позволяют снизить нагрузку на электродвигатель прокатного стана на 10-15 %, т.е. повысить энергоэффективность процесса прокатки шаров;
- на основе выявленных функциональных зависимостей разработана и внедрена методика определения рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана для шаров различных диаметров, как для новых валков, так и для валков после переточки;
- на базе режимов термической обработки, разработанных с помощью компьютерного моделирования, внедрен технологический процесс закалки и отпуска, позволяющий получать 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:

- результаты исследований напряженно-деформированного состояния режимов прокатки мелющих шаров, обеспечивающих технические требования;

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

- результаты компьютерного моделирования прокатки в программном комплексе Deform 3D с использованием калибровки с непрерывно-изменяющимся шагом реборд, показавшие высокую степень сходимости с результатами опытной прокатки;

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

- результаты компьютерного моделирования процесса термической обработки шаров в программном комплексе Deform 3D с использованием базы данных JMatPro, которые показали высокую степень сходимости с результатами промышленного эксперимента.

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

□ **Степень достоверности** результатов работы подтверждается применением фундаментальных положений теории пластичности и обработки металлов давлением, современных средств компьютерного моделирования и анализа технологических процессов, а также высокой сходимостью результатов математического моделирования с результатами промышленных экспериментов и опытных прокаток.

Апробация результатов работы. 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 16 печатных трудах, в том числе 12 статей, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные базы Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 155 страницах текста, включает 86 рисунков, 20 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 147 наименований и одного приложения.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Назначение и технические требования к мелющим шарам

Мировое развитие горнорудной отрасли предъявляет новые требования к обработке горнорудного сырья. Так во всем мире для обработки и измельчения рудного сырья используют стальные мелющие тела шаровидной, цилиндрической и другой формы [1].

Шары мелющие используются в шаровых мельницах, предназначенных для помола различных рудных и нерудных полезных ископаемых, строительных материалов средней твердости. Мельницы используются при производстве стройматериалов (гипс, силикатный кирпич, сухие смеси и др.), при производстве материалов для асфальтобетона (минеральный порошок), при производстве сырья для лакокрасочных материалов, бумаги (микромрамор, микрокальцит), в горнорудной, горнохимической и других отраслях промышленности [2,3].

Мельницы шаровые работают в различных технологических схемах (в открытом или закрытом цикле) и позволяют получать однородный по тонкости продукт измельчения с помощью мелющих тел (шаров и цельпесов).

Производительность мельницы зависит от свойств измельчаемых материалов (прочность, размолоспособность), крупности материалов на входе (до 50 мм), влажности материалов (до 0,5 %), тонкости помола, равномерности питания, заполнения мелющими телами и материалом, качества и твердости мелющих тел.

В зависимости от прочностных характеристик измельчаемых материалов для помола используются мелющие тела соответствующей твердости и износостойкости. Например, для измельчения руд цветных металлов применяются мелющие шары высокой твердости [4].

Основные технические требования и характеристики регламентируются в [5].

По твердости шары подразделяют на группы:

- 1 - нормальной твердости поверхности;
- 2 - повышенной твердости поверхности;
- 3 - высокой твердости поверхности;
- 4 - высокой твердости поверхности с нормированной твердостью на глубине 0,5 радиуса шара;
- 5 - высокой твердости поверхности с нормированной объемной твердостью.

Размеры шаров и предельные их отклонения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Размеры и предельные отклонения шаров
Размеры в миллиметрах

Условный диаметр	Номинальный диаметр	Предельные отклонения от номинального диаметра
15	15,0	±1,0
20	20,0	
25	25,0	
30	31,5	±2,0
35	36,5	
40	41,5	
45	46,5	
50	52,0	±3,0
55	57,0	
60	62,0	
65	68,0	
70	73,0	
80	83,0	±4,0
90	94,0	
100	104,0	
110	114,0	±5,0
120	125,0	

Расчетные параметры шаров приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Расчетные параметры шаров

Условный диаметр шара, мм	Расчетные номинальные параметры			
	площадь поверхности, см	объем, см	масса, кг	Кол-во шаров в одной тонне
15	7,06	1,76	0,014	71428
20	12,56	4,18	0,033	30300
25	19,52	8,18	0,064	15625
30	31,15	16,4	0,128	7812
35	41,83	25,4	0,199	5025
40	54,0	37,4	0,294	3401
45	67,9	52,6	0,413	2421
50	84,9	74,0	0,580	1724
55	102,00	96,9	0,761	1314
60	120,7	125,0	0,980	1020
65	145,20	164,5	1,291	774
70	167,33	204,0	1,600	625
80	216,31	299,0	2,350	425
90	277,45	435,0	3,410	293
100	339,6	589,0	4,620	216
110	408,0	776,0	6,090	164
120	490,6	1023,0	8,030	124

Примечание - Расчет площади поверхности и объема шаров выполнен по их номинальным диаметрам. При расчете массы плотность стали принята равной 7,85 г/см³.

Твердость шаров после термической обработки должна соответствовать нормам, приведенным в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Твердость шаров после термической обработки

Условный диаметр шара, мм	Группа твердости шаров						
	1	2	3	4		5	
	Твердость, HRC/HB, не менее						
	поверхность шара				на глубине 0,5 радиуса шара	поверхность шара	объемная
От 15 до 45 включ.	45/415	49/461	55/534	55/534	45/415	61/601	57/555
Св. 50 до 70 включ.	43/401	48/453	53/514	53/514	43/401	60/590	53/514
Св. 80 до 100 включ.	39/341	42/375	52/495	52/495	40/352	58/567	48/453
Св. 110 до 120 включ.	35/302	38/331	50/477	50/477	35/302	56/545	43/401

Шары изготавливают из стали, в которой содержание углерода и углеродный эквивалент должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Требования к составу стали шаров

Условный диаметр шара, мм	Группа твердости шаров	Массовая доля углерода	Углеродный эквивалент
		%, не менее	
От 15 до 55 включ.	1,2	0,40	0,50
	3		0,70
	4,5	0,60	0,75
Св. 60 до 70 включ.	1,2	0,50	0,70
	3,4		0,75
	5	0,60	0,80
Св. 80 до 120 включ.	1,2	0,50	0,70
	3,4		0,75
	5	0,60	0,85
<p>Примечания</p> <p>1 Допускается изготавливать шары 1 и 2 групп твердости без учета требований по углеродному эквиваленту.</p> <p>2 Допускается изготавливать шары диаметром 60 мм 1 и 2 группы твердости из стали с массовой долей углерода не менее 0,4%.</p>			

Основными потребителями отечественных мелющих шаров являются горно-обогатительные комбинаты России и зарубежных стран (Украина, Казахстан, Польша, Монголия и т.д). Многие отечественные и зарубежные потребители, занимающиеся обработкой твердых руд цветных металлов, предъявляют повышенные требования к прочности, твердости и износостойкости мелющих шаров [4]. Поэтому АО «ЕВРАЗ НТМК» осваивает технологию производства мелющих шаров повышенной прочности и износостойкости, в частности 5 группы твердости по ГОСТ 7524-2015.

1.2 Состав оборудования и описание технологического процесса производства шаров в условиях АО «ЕВРАЗ НТМК»

1.2.2 Комплекс по производству шаров АО «ЕВРАЗ НТМК»

Комплекс по производству шаров включает в свой состав следующие участки (рисунок 1.1):

1. Участок складирования исходной заготовки.

Стеллаж предназначен для разборки связки прутков (снятия металлических стяжек) перед укладкой связки на установку раскладки прутков.

2. Участок посадки.

Установка подачи заготовок предназначена для поштучного разбора пачки, поштучного взвешивания и подачи прутков на приемный рольганг нагревательной печи.

3. Участок нагревательных печей.

Нагревательная печь с шагающим подом предназначена для нагрева заготовки перед прокатом.

4. Участок стана.

Стан двухвалковый поперечно-винтовой прокатки для прокатки стальных шаров диаметром от 60 до 90 мм.

5. Участок закалки шаров.

Участок закалки (закалочный барабан) предназначен для термообработки шаров условным диаметром 60, 70, 80, 90, 100, 110 и 120 мм 1-5 категории твердости шаров.

6. Участок отпуска (снятие внутренних напряжений).

Печь отпуска – проходная конвейерная печь с циркуляционной атмосферой прямого конвективного нагрева.

7. Участок складирования и отгрузки готовой продукции;

8. Участок подготовки сменного оборудования;

9. Участок подготовки и охлаждения воды.

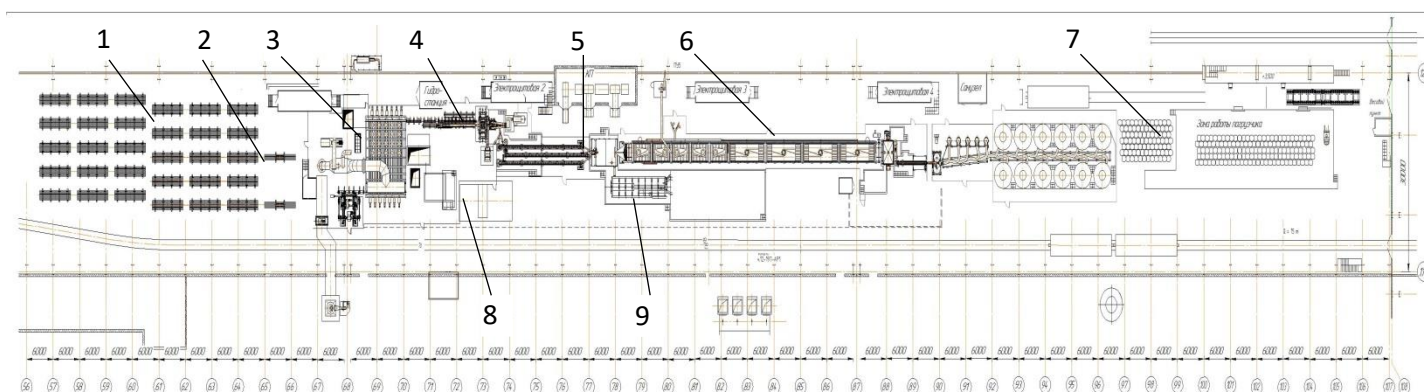


Рисунок 1.1 – Схема расположения основного оборудования шаропрокатного комплекса

1.2.2 Описание технологического процесса производства шаров

Исходным материалом для изготовления шаров является заготовка круглого сечения диаметром 60; 80; 90; 100; 110, 120 мм.

Заготовка после взвешивания поступает на рольганг участка посада и передается через входной проем с закрывающейся шторкой на входной рольганг печи. Приводы рольганга участка посада синхронизированы с приводами входного рольганга печи. Заготовка по рольгангу поступает в печь, далее транспортируется подом печи к рольгангу выгрузки.

Во время перемещения заготовки в печи она нагревается до требуемой температуры прокатки – приблизительно 1050 °С.

Температурный режим нагрева приведен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Температурный режим нагрева заготовок

Диаметр заготовок, мм	Температура печи, °С	
	1 зона	2,3 зона
60-80	950-1000	1000-1050
90-120	950-1020	1000-1070

При выходе заготовки из печи осуществляется измерение температуры заготовки.

Нагретая заготовка выдвигается из печи и передается в прокатный стан.

Температура прокатки должна быть не менее 950 °С.

Заготовки при помощи передаточного устройства подаются во входной желоб.

Все детали стола подачи заготовки, вступающие в контакт с материалом, имеют покрытие из износостойких стальных пластин. Толкатель задает заготовку через направляющий желоб в прокатный стан.

После захвата металла валками, толкатель отводится назад и ожидает приема следующей заготовки.

Во время процесса прокатки прижимное устройство сверху прижимает заготовку с целью предотвращения чрезмерного воздействия при высокой кривизне заготовок. Устройство рассчитано на максимальную кривизну 0,6% от длины заготовки для диаметров 60/70/80/90мм и 0,4% от длины заготовки для диаметров 100/110/120мм.

В процессе прохождения заготовки через прокатный стан, формируются шары, которые затем падают в наклонный желоб. Пирометр, находящийся после стана замеряет актуальную температуру каждого шара.

Во время прокатки сегмент шара головной и хвостовой части загружается в лоток для скрапа и по конвейеру попадает в скиповую тару.

Шары после шаропрокатного стана скатываются через желоб и проходят через пирометр, который измеряет температуру каждого шара, и через фотобарьер, который распознает и подсчитывает количество шаров.

Перед тем как сегмент хвостовой части выходит из шаропрокатного стана, спускной желоб для скрапа перемещается назад. Спускной желоб для скрапа остается в этом положении до тех пор, пока не упадет сегмент головной части следующей заготовки.

После прокатки шары проходят термическую обработку. Термическая обработка шаров заключается в выравнивании температуры по всему объёму шара в индивидуальной ячейке транспортирующего конвейера, дальнейшей закалке в

барабанной установке револьверного типа, с последующим отпуском для снятия напряжений в отпускной печи.

Шары с помощью дозирующего устройства сортируются в индивидуальные ячейки трехручьевого конвейера и транспортируются к задающему лотку барабанной установки. Во время транспортирования происходит выравнивание температуры шаров на поверхности и снижение её до заданных значений. Передача шаров к закалочной установке осуществляется по одному или трем ручьям конвейера в зависимости от группы твердости и марки стали. Температура шаров на выходе из конвейера для пятой группы твердости 670-800 °С. Контроль температуры производится как на входе, так и на выходе с конвейера.

По задающему лотку, с помощью дозирующего устройства, шары сортируются по индивидуальным ячейкам барабанной установки, где охлаждаются водой.

Вращаясь, барабан обеспечивает вращение и транспортирование шара относительно воды, исключая образование паровых рубашек.

Система подачи воды выполняет подвод заданного объема воды от насоса подачи, обеспечивает равномерное распределение потока воды по диаметру барабана, выполняет подвод воды к форсункам, установленным в местах переката шара, а также позволяет настроить требуемое соотношение потоков.

Режимы закалки шаров в закалочном барабане устанавливаются в начале прокатки и термообработки.

Из последней секции закалочного барабана, шар попадает в барабан выгрузки, который поднимает шар из воды и передает в лоток выгрузки из установки закалки шаров. Шары охлаждаются до комнатной температуры.

Заданная температура воды обеспечивается режимом работы оборудования водоподготовки и темпом прокатки. Температура воды для закалки шаров пятой группы твердости составляет $52 \pm 2^\circ\text{C}$.

Закалочный барабан конструктивно представляет собой набор из 25 дисков, каждый из которых имеет по 30 ячеек (рисунок 1.2). В диаметральном сечении диаметр дисков и форма ячеек образуют прямой и обратный конусы, которые

используются для ориентации шаров в ячейке и передачи шаров между секциями. Диски соединены с валом с помощью призматических шпонок. Передача шаров между секциями происходит через специальные окна в разделительных элементах. Для гарантированного перемещения шаров между секциями используются форсунки.

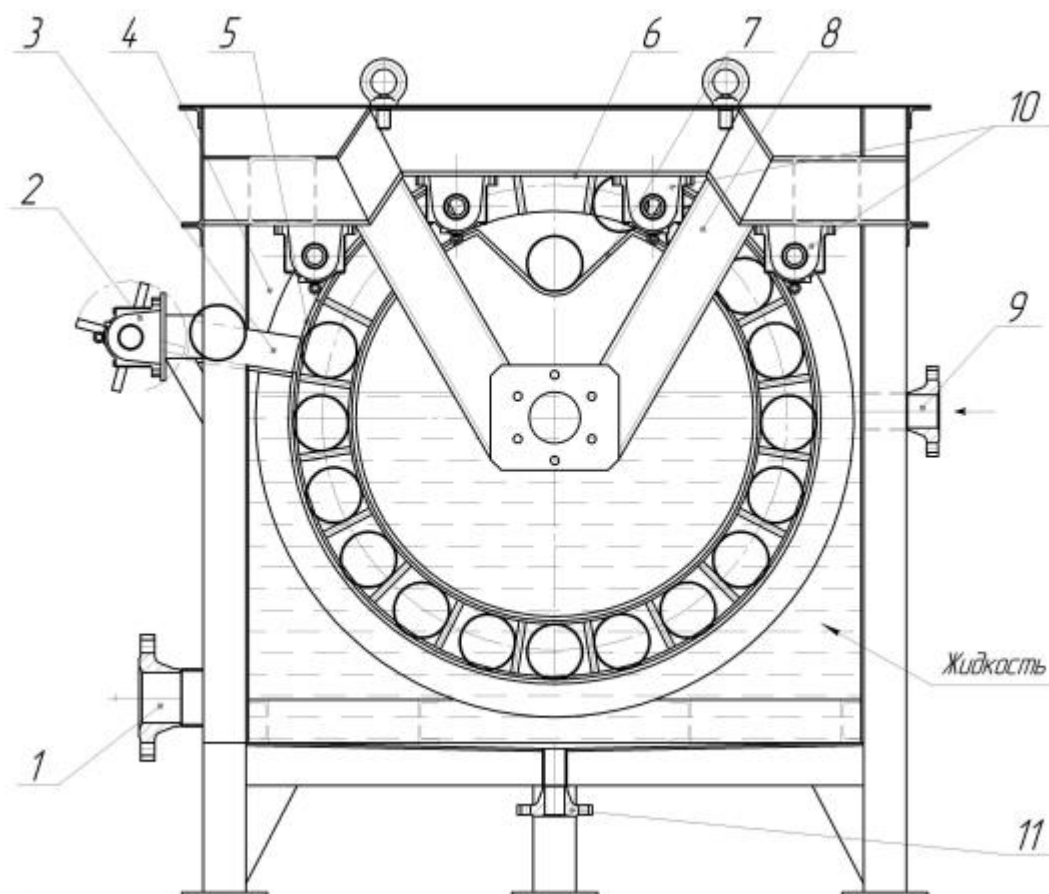


Рисунок 1.2 - Основные элементы конструкции закалочного барабана:

- 1 – отвод жидкости; 2 – дозатор; 3 – лоток приемный; 4 – емкость;
 5 – внешняя неподвижная часть барабана; 6 – подвижная часть барабана;
 7 – внутренняя неподвижная часть барабана; 8 – шар; 9 – подвод жидкости;
 10 – ролик; 11 – слив с емкости в дренаж

После закалки шары подаются в накопитель, далее - загружаются в отпускную печь. Механизм загрузки шаров на транспортер отпускной печи состоит из рамной конструкции, на которой расположены лоток, отбойник, заслонка с противовесом.

Температура отпуска шаров пятой группы твердости – 180-250 °С. Время отпуска – 240 мин.

Шары накапливаются перед заслонкой, распределяясь в ряды, равные ширине транспортера. Заслонка посредством электрической тали поднимается в верхнее положение. Шары рядами попадают на настил транспортера, который перемещает их в отпускную печь, которая состоит из пяти зон нагрева и четырех зон выдержки.

При остановке оборудования производится принудительное опускание заслонки. Заслонкой отделяются в отдельные партии шары новых плавок и шары, полученные из заготовок с нарушением технологического режима производства.

Шары с транспортера отпускной печи попадают на загрузочный лоток. Пластины переключника находятся в верхнем положении, ограничивая перекачивание шаров в устройство охлаждения готового шара. Пневмоцилиндр переключник опускает пластины, направляя ряд шаров в ячейку барабана устройства охлаждения готового шара (УОГШ). После загрузки ряда шаров переключник возвращается в исходное положение, далее процесс повторяется.

Во время вращения барабана шары охлаждаются водой, подаваемой на них через форсунки системы охлаждения. Пары воды улавливаются пароотводящим зонтом и удаляются системой аспирации. Излишки воды собираются в баке и отводятся через дренажный патрубок. Количество подаваемой воды регулируется затвором поворотным дисковым. После охлаждения ряд шаров, из ячейки барабана перекачивается по лотку в разгрузочный лоток. Пневмоцилиндр поднимает лоток разгрузочный и шары перекачиваются по нему к питателю роторному, который захватывая лопастями, поштучно передает их на конвейер готового шара.

Конвейер готового шара оснащен датчиками температуры шара, отслеживания кинематических характеристик и контроля движения, в том числе и аварийными датчиками.

Конвейер готового шара установлен на эстакаде под углом 50° и транспортирует шары в два устройства взвешивания готовой продукции, оснащенные весовыми тензодатчиками. На устройствах взвешивания готовой продукции формируются партии шаров массой не более 2 т.

1.2.3 Проблемы технологического процесса прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров

На АО «ЕВРАЗ НТМК» действуют два участка по производству мелющих шаров: шаропрокатный участок крупносортового цеха (ШПС КСЦ) и шаропрокатный участок рельсобалочного цеха (ШПС РБЦ, описан выше). Состав основного оборудования практически аналогичный (нагревательные печи, шаропрокатные станы, закалочный барабан). На ШПС РБЦ установлен новый тип оборудования и дополнительно отпускная печь для снятия внутренних напряжений мелющих шаров. На ШПС КСЦ производится самотпуск шаров в бункерах с теплоизоляционными крышками. Реализуемая до настоящего времени технология термомеханической обработки шаров не позволяет получать мелющие шары 5 группы твердости в соответствии с [5].

В настоящий момент при прокатке шаров условным диаметром 100 мм используются двухзаходные валки (рисунок 1.3). При прокатке мелющих шаров диаметром 120 мм применяется однозаходная калибровка (рисунок 1.4-1.5). В процессе прокатки шаров при применении двухзаходной калибровки вертикальный угол наклона валков составляет $4,5-5^\circ$, т.к. он равен среднему углу наклона реборд (таблица 1.6). Для двухзаходной калибровки и диаметре валка 700 мм теоретический угол составляет $5,7^\circ$.

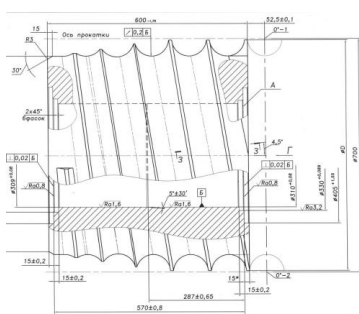


Рисунок 1.3 – Прокатный валок с двухзаходной калибровкой для прокатки шаров диаметром 100 мм

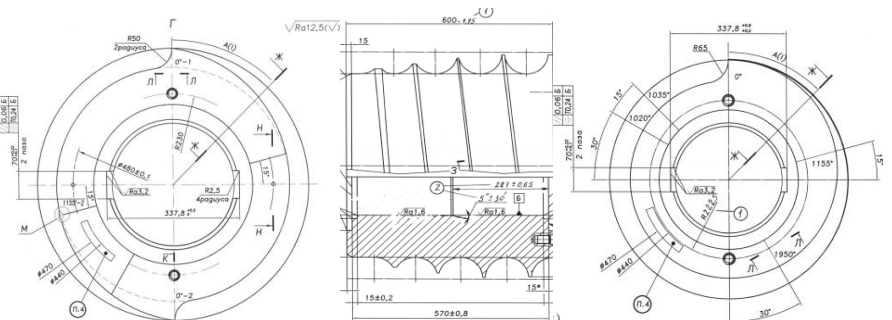


Рисунок 1.4 – Прокатный валок с однозаходной калибровкой для прокатки шаров диаметром 120 мм

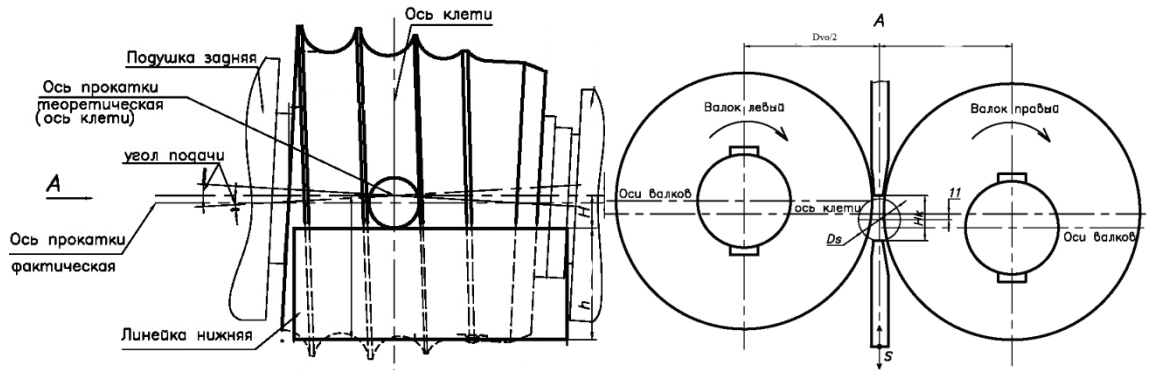


Рисунок 1.5 – Расположение прокатных валков при настройке

Таблица 1.6 – Теоретические настроечные параметры

Калибровка валка	Диаметр холодного шара (ном.), мм	Расчетные расстояния от оси валка до оси прокатки D_v (валки параллельны), мм			Расстояние между ребрами валков в пережиме, мм	К, мм	Угол наклона валков, °, град
		Номинал	вход	выход			
Ø120 однозаходная	124,8	350	349	347,25	17,7	13 (10,3%)	2,5-3,5
Ø100 двухзаходная	104,0	350	349	347,25	13,0	10 (9,5%)	4-5

При двухзаходной- прокатке мелющих шаров диаметром 100 мм из-за большого угла подачи прокатных валков имеет место повышенный износ реборд не только в нормальном (перпендикулярно оси валка – по вершинам реборд), но и в тангенциальном (вдоль оси валка - по боковой стороне реборд) направлениях (рисунки 1.5, 1.6). Данный фактор значительно увеличивает расход прокатных валков [6]. При установлении угла наклона валков $3,5^\circ$ на данных валках происходит незаполненные калибра и плохое отделение перемычки.



Рисунок 1.6 – Прокатные валки с износом на участке разрыва перемычки между шарами.

Производство шаров диаметром 100 мм на валках с двухзаходной калибровкой с повышенным износом поверхности реборд приводит к появлению на поверхности шаров характерных дефектов, размеры которых могут превысить предельно-допустимые (рисунок 1.7, 1.8).

В процессе производства шара диаметром 100 мм возникают следующие проблемы:

- плохое отделение перемычек от шара (рисунок 1.7);



Рисунок 1.7 – Шары с неотделенной перемычкой.

- не отделение переднего сегмента от первого шара («рюмка»);

- при устранении вышеперечисленных дефектов при помощи осевого смещения валков появляется дефект в виде образования наплыва на полюсе шара «шляпка» (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Мелющие шары диаметром 100 мм при износе реборд валков.

- при использовании технологии производства ШПС КСЦ отсутствует возможность получения 5 группы твердости на шарах диаметром 100 мм

Введение в эксплуатацию современного оборудования нового участка ШПС РБЦ требует научных изысканий в области разработки технологических процессов прокатки и термомеханической обработки шаров с целью обеспечения технических и эксплуатационных требований потребителя.

При введении новых современных мощностей необходимо прорабатывать новые технологии с целью получения стабильного процесса производства мелющих шаров с повышенными прочностными и эксплуатационными свойствами. Для достижения данных целей разрабатываются оптимальные процессы прокатки мелющих шаров из специальных легированных сталей, разрабатываются и моделируются режимы термической обработки, отрабатываются процессы многостадийной термообработки; совершенствуются методы контроля, производится реконструкция производственных мощностей.

1.3 Обзор технологии производства изготовителей мелющих шаров

Компании зарубежных стран производят мелющие шары в основном из круглой заготовки высокоуглеродистой легированной стали с применением специальной технологии нагрева,ковки или прокатки и термомеханической обработки. Обычной практикой за рубежом является производство шаров диаметром до 80-90 мм методом поперечно-винтовой прокатки, а шары более 100 мм методом горячей штамповки.

В связи с повышением требований к качеству производимых мелющих шаров с 2015 г. в классификацию мелющих шаров по группам твердости ГОСТ 7524–2015 введена 5-я группа, характеризующаяся высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью. Для получения мелющих шаров повышенной твердости с сохранением высоких эксплуатационных свойств на металлургических предприятиях разрабатываются мероприятия в том числе для получения продукции отвечающей требованиям зарубежных потребителей.

Рассмотрены технологии производства и проведен сравнительный анализ основных параметров производства мелющих шаров на ОАО «ЕВРАЗ ОЗСМК» ОАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «МК «Азовсталь» (Украина), Moly-Cor (Австралия) и Goldpro (Китай) (таблица 1.7).

Таблица 1.7 Сравнительная таблица технологии производства

Параметры	ПАО «МК «Азовсталь»	АО «ЕВРАЗ НТМК»		АО «ЕВРАЗ ОЗСМК»	Moly-Cop	Goldpro
		ШПС КСЦ	ШПС РБЦ			
1	2	3	4	5	6	7
Поставки на рынки	ГОКи холдинга «МЕТИНВЕСТ» внутренний рынок	Внешний и внутренний рынки				
Исходная заготовка	Слиток 8,7т (конвертерный цех)	НЛЗ, длина заказная (конвертерный цех)		НЛЗ длина заказная (конверторный и электро-сталеплавильный цех)	НЛЗ, длина заказная	
Сортамент шаров	ШПС 40- 80: Ø40, Ø60, Ø80 мм; ШПС 80-120: Ø80, Ø90, Ø100, Ø120 мм.		Ø60, Ø80, Ø100, Ø120 мм	ШПС – 1: Ø30, Ø40, Ø50, Ø60, Ø70, Ø80 мм; ШПС – 2: Ø40, Ø50, Ø60, Ø70, Ø80, Ø100 мм.	Ø25- Ø150	Ø25- Ø150
Твердость шаров	по ГОСТ 7524 группы твердости 1, 2, 3 - весь сортамент; 4 - Ø 40, 60 мм 5 - Ø 40 мм	по ГОСТ 7524 группы твердости: 1, 2, 3, 4- весь сортамент.	по ГОСТ 7524 группы твердости: 1, 2, 3, 4 весь сортамент	по ГОСТ 7524-89: 1, 2, 3, 4- весь сортамент;	Поверхностная твердость от 57 до 62 HRC	
Нагрев шаровой заготовки. Нагревательные печи	Тип - Секционная, скоростного нагрева		Тип – Камерная с шагающими балками	ШПС – 1: Тип - Секционная, скоростного нагрева. ШПС – 2: Тип – Камерная с шагающими балками.	Тип -Индукционные печи	
Изготовление шаров	Тип стана - поперечно-винтовой прокатки Станина рабочей клетки – открытого типа, верхние части стоек станины соединены траверзой и зафиксированы при помощи клиньев. Характеристики приводов – одинаковые, шпиндельные.				Шары Ø25- Ø90 производятся способом поперечно-винтовой прокатки. Шары Ø93 - Ø150 производятся способом горячей штамповки.	

1	2	3	4	5	6	7
Термообработка шаров: Закалка	Подстуживание шаров на воздухе в ковшиках транспортирующего конвейера с последующим охлаждением водой в барабанной установке шнекового типа. Остывание шара до температуры самоотпуска.		Подстуживание шаров на воздухе в ковшиках транспортирующего конвейера с последующим охлаждением водой в барабанной установке револьверного типа.	ШПС -2 По аналогии с ПАО «МК «Азовсталь» и ШПС КСЦ АО «ЕВРАЗ НТМК». ШПС -1 Закалка шаров после прокатки на стане в закалочном баке с проточной водой или двухстадийная закалка. Остывание шара до температуры самоотпуска.	Отдельный нагрев шаров в индукционной печи для последующей закалки в воде в закалочной установке	Отдельный нагрев шаров в индукционной печи для последующей закалки в воде в закалочной установке конвейерного типа.
Отпуск	Самоотпуск в бункерах		Отпускная печь	ШПС №1 -самоотпуск в бункерах ШПС №2 – самоотпуск в термосах	Отпускная печь	
Количество бункеров, шт	20	11		12		
Емкость бункеров, т	150			ШПС №1-200 ШПС №2-10 (термос)		
Бункера	Утепленные			Неутепленные		
Длительность отпуска, ч	16-48 (под крышкой)	6 (под крышкой)		6		

Основной состав и технические характеристики оборудования шаропрокатных станов ПАО «МК «Азовсталь» и ШПС КСЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» сопоставимы. Шаропрокатный стан ШПС – 1 АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» имеет отличительную техническую характеристику и состав оборудования от ШПС 40-80 ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Состав оборудования Moly-Cor и Goldpro значительно отличается от остальных.

Все представленные производители шаров поставляют мелющие шары на внутренние и внешние рынки, кроме ПАО «МК «Азовсталь». Данный украинский металлургический комбинат производит шары для горно-обогачительных активов своего холдинга.

На ПАО «МК «Азовсталь» для изготовления шаровой заготовки используется исходная слитковая заготовка массой 8,7 т конвертерного производства. На остальных представленных предприятиях используется непрерывно-литая заготовка конвертерного производства, а на АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» также и электросталеплавильного производства.

Сортамент производства шаров на основных предприятиях имеет схожий диапазон. Шаропрокатные станы ПАО «МК «Азовсталь» и ШПС КСЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» имеют абсолютно одинаковую проектную линейку диаметров на обоих станах (на стане ШПС 80-120 ШПС КСЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» в 2018 году дополнительно был освоен шар промежуточного диаметра 90 мм) при этом шары диаметром 80 мм производятся на обоих станах. На новом стане ШПС РБЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» сортамент шаров освоен диаметром от 60 до 120 мм. АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» производит мелющие шары диаметром от 30 до 100 мм на двух станах, причем шары диаметром от 40 мм до 80 мм прокатываются на обоих станах. Зарубежные компании Moly-Cor и Goldpro производят мелющие шары в основном диаметром от 25 мм до 150 мм в дюймовом измерении.

Отечественные и украинские производители производят шары твердостью в соответствии с [5]. АО «ЕВРАЗ НТМК» и АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» могут производить шары всех диаметров с 1 по 4 группы твердости. Для освоения шаров 5 группы твердости на ШПС РБЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» необходимо проводить

изыскательские работы. ПАО «МК «Азовсталь» могут производить шары всех диаметров с 1 по 4 группы твердости, а также шары 40 мм – 5 группы твердости. Зарубежные компании производят мелющие шары по согласованной спецификации с потребителем с твердостью до 57-62 HRC.

Для нагрева заготовок на отечественных и украинских предприятиях старого типа используются секционные нагревательные печи скоростного нагрева, для нового типа используются камерные печи с шагающими балками. Зарубежные предприятия в основном используют индукционные печи.

С активным развитием прокатного производства в советский период на крупных предприятиях были спроектированы типовые шаропрокатные станы поперечно-винтовой прокатки для производства мелющих шаров в основном из рельсовой стали и установлены на заводах «Азовсталь» и НТ МК. В дальнейшем на других отечественных предприятиях также устанавливались и использовались шаропрокатные станы для всех диаметров шаров. На зарубежных предприятиях в основном шары $\varnothing 25$ - $\varnothing 90$ производятся способом поперечно-винтовой прокатки, а шары $\varnothing 93$ - $\varnothing 150$ производятся способом горячей штамповки.

Термическое упрочнение шаров на отечественных предприятиях по типовой разработке осуществляется с прокатного нагрева и заключается в подстуживании на воздухе в ковшиках транспортирующего конвейера с последующим охлаждением водой в барабанной установке шнекового типа до температуры самоотпуска. На ШПС-2 АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» закалка производится в баке с проточной водой до температуры самоотпуска. В компаниях Moly-Cor и Goldpro термическая обработка производится с отдельным нагревом шаров перед закалкой в установках, разработанных по запатентованной технологии.

С целью снятия внутренних напряжений после закалки на ПАО «МК «Азовсталь», ШПС КСЦ АО «ЕВРАЗ НТМК» и ШПС-1 АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» проводится самоотпуск шаров в бункерах с возможностью загрузки до 120 т. Самоотпуск происходит за счет достаточной температуры шаров после закалки (ниже температуры фазовых превращений) для проведения замедленного охлаждения. На ШПС-2 АО «ЕВРАЗ ОЗСМК» самоотпуск производится в

термосах с возможностью загрузки до 10 т. У остальных производителей для снятия внутренних напряжений используется отпускная печь.

Для отечественных потребителей и потребителей стран СНГ в соответствии с [5] химический состав стали определяется по таблице 1.4.

Moly-Cop и Goldpro являются поставщиками шаров для мельниц первой стадии измельчения или для мельниц SAG (полусамоизмельчения). Химический состав стали шаров согласовывается с поставщиками заготовки и изменяется в зависимости от диаметра шара (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Химический состав стали шаров Moly-Cop.

Базовый химический состав стали (%), Fe – остальное												
Диаметр	C		Mn		Si		Cr		Mo		S	P
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	max	max
94	0,75	0,85	0,85	1,35	0,10	0,35	0,50	1,00	-	0,10	0,035	0,030
105	0,75	0,85	0,85	1,35	0,10	0,35	0,50	1,00	-	0,10	0,035	0,030
125	0,75	0,85	0,75	1,25	0,15	0,35	0,75	1,25	-	0,10	0,035	0,030
133	0,75	0,85	0,75	1,25	0,15	0,35	0,75	1,25	-	0,10	0,035	0,030
140	0,75	0,85	0,75	1,25	0,15	0,35	0,75	1,25	-	0,10	0,035	0,030

Анализ технологии производства мелющих шаров позволяет сделать вывод, что для получения мелющих шаров с требуемыми техническими характеристиками необходима разработка технологических параметров нагрева, прокатки, закалки и отпуска шаров с определенным химическим составом стали.

1.4 Литературный обзор исследований в области производства стальных мелющих шаров

1.4.1 Литературный обзор исследований в области прокатки стальных мелющих шаров

При поперечно-винтовой прокатке формирование шаров происходит между вращающимися в одном направлении валками, при этом круглая заготовка

вращается в направлении, противоположном вращению валков и одновременно перемещается вдоль своей оси [7].

Впервые модель винтовых валков была разработана в Германии в 1888 [8], где на поверхность валков конусной формы нанесли винтовые калибры, при этом, из-за сложности изготовления валков и малого искажения калибров, такой способ не получил применения. Следующая попытка разработки машины для производства шаров поперечно-винтовой прокаткой датируется 24 февраля 1925 г. [9], когда американский изобретатель Ходж подал заявку на патент «Машина для прокатки шаров». Отличие заключалось в том, что валки имели цилиндрическую форму с незначительной конусностью (углом подъема реборды). Изобретатель Пол Клампп [10] предложил использовать данную конструкцию стана для изготовления коротких тел вращения, представив патент «Стан для прокатки изделий круглого сечения и неправильного профиля», затем ее доработали японские изобретатели [11].

Практическое применение вышеупомянутых технологий, а также их научное обоснование было проведено в СССР командой ученых ВНИИМЕТМАШ под руководством академика А.И.Целикова [11, 12] в 1940-1950 гг. В 1951 году был запущен первый промышленный стан производства заготовок подшипниковых шаров 25-50 мм [12-14].

В классическом виде нарезка винтового калибра происходит на токарно-винторезных станках, которые ограничены дискретностью шага. Изготовленные таким методом валки требуют обкатки на стане. Впервые возможность применения непрерывно-изменяющегося шага предположено с применением специальных копируемых устройств, для его обеспечения. Одним из первых исследовал и использовал непрерывно-меняющийся шаг В.И. Котенок [15]. Его способ калибровки заключается в применении непрерывно-изменяющегося шага по заданной функции, с использованием копируемых полуавтоматов. Применение данного способа в настоящий момент является наиболее технологичным, рациональным и позволяет получить оптимальные параметры обжатия [16].

С появлением программного обеспечения для моделирования прокатки шаров появляются исследования, основанные на МКЭ [17]. Компьютерное моделирование процесса в условиях промышленного производства позволяет понять, как изменение тех или иных параметров технологического процесса поперечно-винтовой прокатки и термической обработки (скорость и температура прокатки, напряженно-деформированное состояние, скорость и время охлаждения, свойства охлаждающей среды, изменение хим. состава исходной заготовки и многое другое) повлияет на микроструктурные процессы и, как следствие, на потребительские свойства.

Компьютерным моделированием занимались зарубежные исследователи с использованием специальных программных комплексов. Было проведено моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки шаров в системе ANSYS китайскими исследователями [18]. В качестве материала был выбран алюминий. Согласно данному исследованию было выявлено, что при формировании и врезке реборды металл течет в обоих направлениях, соответственно объем, поступающий в шар, эквивалентен объему, переходящему в заготовку, что доказывает наличие растягивающих напряжений, которые значительно превышают напряжения сжатия.

Растягивающие напряжения возникают в центральной части заготовки вдоль ее оси. При превышении данных напряжений межкристаллической связи, происходит образование пустот. Данные пустоты могут достигать значительных размеров и образуют сплошное отверстие в металле, так называемый «Эффект Маннесмана» [19]. Данный феномен был назван в честь братьев Маннесманов, разработавших в 1891 году пилигримовый стан для прокатки бесшовных труб.

В Китае на основе мирового опыта о процессах поперечно-винтовой прокатки, было освоено и получено множество продуктов различных форм [20-22]. Кроме шаров различных диаметров были получены ролики, короткие ступенчатые валы, шпильки и множество других продуктов. В статье [23] описано, что число отходов металла достигает 23% в большей степени по причине образования шаров с

внутренними пустотами. Для уменьшения процента отходов авторы не ограничивают процесс прокатки и допускают получение шаров с пустотами, но в дальнейшем данные шары подвергают штамповке, что позволяет практически полностью исключить пустоты, при этом полученные отклонения размеров шаров не превышают допустимых значений.

В ряде исследований были рассмотрены принципы поперечно-клиновой прокатки. Наиболее интересный способ прокатки ступенчатых валов был описан в статье [24,25], т.е. используя принцип переменного шага, существует возможность проектировать валки для прокатки не только сплошных, но и полых деталей, что показывает нахождение оптимального распределения напряжений, позволяющих при прокатке сохранять исходную форму поверхностей, не находящихся в контакте с валком.

Основная часть работ польских ученых Люблинского технологического университета (Збигнев Патер, Януш Томчек и др.) заключается в моделировании процессов при помощи программного обеспечения методом конечных элементов. Так, ими был предложен способ прокатки шаров из головок рельсов [26,27]. Согласно данной статье существует возможность изготовления мелющих шаров из головок изношенных железнодорожных рельсов методом поперечно-винтовой прокатки.

В следующем исследовании для анализа характера износа валков авторы Збигнев Патер, Януш Томчек, Томаш Булзак использовали программные комплексы Simufact Engineering, как результат соединения двух программных модулей: MSC.SuperForm и MSC.SuperForge [28-34].

Согласно данному исследованию было доказано, что нагрузки и крутящий момент в процессе винтовой прокатки шаров имеют характерные периодические колебания, при этом износ инструмента деформации возникает из-за множества факторов. Контактные взаимодействия вызывают износ инструмента. Самый распространенный тип износа инструмента в процессах прокатки металла -

абразивный износ. Износ инструмента при прокатке вызывает увеличение размеров готового продукта.

В следующей статье авторы (Збигнев Патер и др.) изучают влияние параметров процесса (диаметра заготовки, температуры нагрева заготовки перед прокаткой) на качество получаемых шаров на примере получения шаров с условным диаметром 40 мм [35].

Наиболее необычным из предложенных данными авторами процессов прокатки шаров является способ их производства поперечной прокаткой [36]. Предложенный метод поперечной прокатки может быть использован для формирования шести шаров диаметром 100 мм одновременно. При прокатке шести шаров диаметром 100 мм, минимальная длина валка должна быть равна 800 мм. Однако, процесс поперечной прокатки, даже при возможности одновременного формирования нескольких шаров за один оборот требует проведения дополнительных затратных мероприятий для установки заготовки в межвалковое пространство и имеет трудности с автоматизацией процесса. Поперечная прокатка в большей мере используется для изготовления деталей более сложной конфигурации и значительной длины, где другие способы прокатки неприемлемы. А для производства шаров поперечно-винтовая прокатка более эффективна, т.к. подвергаются автоматизации и являются в большей мере производительными. Поперечно-винтовая эффективна по причине торцевой задачи заготовки, где возможна непрерывность процесса.

В последней рассматриваемой публикации данных авторов [37] описываются различные конструкции шаропрокатных валков, преимущества и недостатки той или иной калибровки шаропрокатных валков.

Существует исследование немецких ученых аналогичного процесса поперечной прокатки при раскатке вала [39], где представлены результаты экспериментальных исследований, которые показывают влияние параметров процесса: температуры, геометрии инструмента и скорости на качество продукции. Экспериментальные результаты также проверены методом конечных элементов.

Соответственно, данное исследование одним из первых представляет собой моделирование процессов поперечной прокатки методом конечных элементов.

Из исследований последних лет стоит отметить моделирование прокатки шаров учеными из Украины [40], где подробно рассмотрен процесс моделирования прокатки шаров на шаропрокатных станах [36].

1.4.2 Литературный обзор исследований в области термомеханической обработки стальных мелющих шаров

Важная роль при изготовлении стальных мелющих шаров принадлежит таким эксплуатационным характеристикам стали, как способность к хрупкому разрушению, коррозионно-абразивный износ, глубина закаленного слоя, которые в значительной степени зависят от режима термической обработки и полученной структуры. Структура, обусловленная химическим составом металла и режимом охлаждения, наряду с другими факторами (величиной зерна аустенита, наличием внутренних напряжений) является характеристикой, знание которой необходимо для оценки работоспособности мелющих шаров. Термическая обработка мелющих шаров, которая включает тепловое воздействие на металл, определяет различные изменения формирования структуры, фазового состояния, напряженного состояния и соответственно свойств, величины и распределения микро- и макронапряжений, которыми можно управлять. Деформационно-термическая обработка может быть использована с целью повышения прочности стальных шаров с использованием тепла прокатного нагрева, в основном углеродистых и низколегированных сталей. Использование тепла прокатки для проведения деформационно-термической обработки позволяет значительно сократить энерго- и трудозатраты [36-46].

Из анализа опубликованных данных установлено, что стальные мелющие шары, которые изготавливаются отечественной промышленностью, имеют в целом невысокую и неравномерную поверхностную твердость, малую глубину закалки,

повышенную склонность к расколу в мельницах, в результате чего в 3–5 раз уступают аналогичным зарубежным продуктам [47-50].

На основании исследований выбора материала и технологии термомеханической обработки мелющих шаров используемых для измельчения материалов специалисты из Украины предложили режимы термической обработки (ТО) мелющих шаров диаметром 20 – 60 мм с прокатного нагрева. Установлены особенности формирования микроструктуры стали при термической обработке. Определена температура начала мартенситного превращения. Производились испытания в промышленных условиях опытных партий мелющих шаров диаметром 60 мм с объемной твердостью HRC 59,5.

На основании полученного опыта комбинатом «Азовсталь» представлена технология трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров диаметром 120 мм с твердостью по 3-й группе твердости по ГОСТ 7524-2015. Термоупрочнение осуществляется по схеме прерванной закалки, на выходе из закалочного устройства в центре шаров сохраняется определенное количество теплоты, вызывающей разогрев поверхности и обеспечивающей протекание самоотпуска. Перечисленные выше параметры влияют на температуру самоотпуска. Температура самоотпуска является ключевым технологическим показателем, предопределяющим твердость и уровень напряжений в готовых шарах.

Отличительной особенностью современной технологии термомеханической обработки шаров является применение закалочных барабанов револьверного типа для исключения «пятнистости» шаров и применение отпускных печей для снятия внутренних напряжений и исключения расколов в шаровых мельницах.

За последние годы в России были введены в эксплуатацию новые шаропрокатные станы на таких предприятиях как «Северсталь» (Череповец), УГМК (Сухой Лог), ЕВРАЗ НТМК (Нижний Тагил), поэтому совершенствование процессов поперечно-винтовой прокатки и термомеханической обработки при производстве мелющих шаров на сегодняшний день является актуальной темой для научных изысканий.

1.5 Анализ существующих методик расчета калибровки прокатных валков шаропрокатных станов

Основной рабочий инструмент стана для прокатки шаров прокатный валок с винтовым калибром.

Согласно методике, разработанной ВНИИМЕТМАШ [51] по характеру деформации калибр валка условно можно разделить на две части: формующий участок, на котором осуществляется захват заготовки и ее постепенное обжатие в шар, соединенный перемычкой с остальной частью заготовки, и отделочный участок, где производятся калибровка шара и отделение его от остальной заготовки.

Формовка шаровой заготовки осуществляется ребордами, высота которых постепенно возрастает. Для упрощения расчета калибровки и изготовления валков принято, что высота реборды калибра изменяется по закону прямой линии.

Для обеспечения нормального процесса прокатки профиль и размеры формующего участка калибра рассчитываются таким образом, чтобы в процессе обжатия заготовки соблюдались следующие три основных условия:

- 1) объем металла, обжимаемый в калибре, должен оставаться постоянным в течение всего процесса формовки шара;
- 2) изменение профиля и размеров реборды калибра должно соответствовать вытяжке обжимаемой заготовки;
- 3) обжатие должно осуществляться относительно узкими участками, чтобы предотвратить разрушение металла в осевой зоне заготовки.

Наличие небольшого избытка металла допустимо лишь в начале калибра, когда реборда еще сравнительно низка и не препятствует вытеснению избытка металла из калибра. Однако для вытеснения избытка металла дополнительно затрачивается работа, что приводит к росту мощности, расходуемой на деформацию металла. Чтобы обеспечить постоянство объема металла в калибре, реборды валка должны иметь по длине калибра строго определенную толщину.

Согласно второму условию нормального образования формы шара вытяжка

обжимаемого участка заготовки должна соответствовать изменению формы и размеров реборды калибра. В случае прокатки шаров длина обжимаемой перемычки (b_a) должна быть равна ширине прямого участка реборды калибра (a_a).

Если изменение ширины реборды калибра меньше вытяжки обжимаемой заготовки ($a_a < b_a$), то металл будет отходить от реборды и на поверхности заготовки будет образовываться накат (рисунок 1.19), который при дальнейшем обжатии заготовки раскатается в плену. Если же изменение ширины реборды калибра больше, чем вытяжка заготовки ($a_a > b_a$), то в обжимаемой перемычке возникают осевые растягивающие напряжения, которые могут привести к разрыву перемычки.

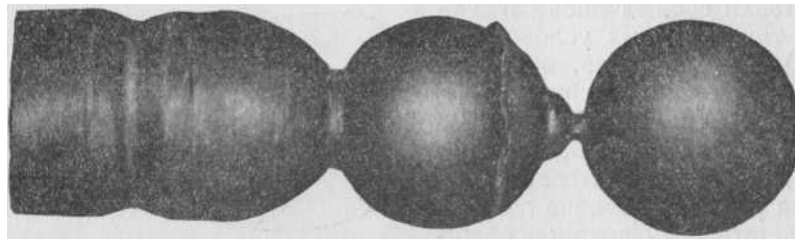


Рисунок 1.19 – Образование наката на поверхности шара

Методика расчета однозаходной калибровки [51]

На основании опыта промышленной эксплуатации станов для прокатки шаров могут быть рекомендованы следующие исходные данные для проектирования калибровки валков.

1. Диаметр прокатного валка выбирается, исходя из условий прочности осей валков и надежности захвата заготовки валками.
2. Радиус поперечного сечения калибра определяется с учетом объемного расширения заготовки при нагреве ее до температуры прокатки:

$$R = 1,01 D_{ш}/2 \quad (1.3)$$

где $D_{ш}$ — диаметр прокатываемого шара.

3. Протяженность калибра условно измеряют в градусах развертки винтовой линии калибра.

Общая протяженность калибра колеблется в пределах от 1170 до 1350°, причем протяженность отделочного участка обычно принимается равной 810° (в том числе 270° от нулевой точки калибра до начала реборды). Протяженность формирующего участка калибра (от одного до 1,5 витков, $\alpha = 360\text{—}540^\circ$) выбирается, исходя из следующих соображений. При длинном формирующем участке калибра уменьшается интенсивность обжатия заготовки, вследствие чего улучшаются условия захвата ее валками. Расход энергии на прокатку при этом увеличивается. Увеличивается также опасность разрушения металла в осевой зоне. При уменьшении длины калибра увеличивается интенсивность обжатия, что приводит к увеличению износа валков. Опасность разрушения металла в центральной части заготовки уменьшается.

4. Диаметры перемычек, соединяющих прокатанные шары, должны быть возможно меньшими; чем тоньше перемычки, тем легче отбиваются они при галтовке шаров в барабанах. Однако при уменьшении диаметра перемычки уменьшается толщина, а следовательно, и стойкость рабочей проводки.

5. Высота реборды в начале калибра выбирается, исходя из условия надежного захвата заготовки валками.

6. Во избежание разрушения в центральной части заготовки ширина реборды в отделочном участке калибра, как уже отмечалось, должна быть возможно меньшей. Глубина канавок на вершине реборды выбирается так, чтобы объем образовавшегося кармана соответствовал объему металла, вытесняемому ребордой при утонении перемычки.

7. На первом витке калибра ($\alpha = 360^\circ$) при обжатии заготовки металл свободно оттесняется назад, т.е. в сторону, противоположную направлению движения заготовки. Вследствие этого ширина реборды на этом участке должна выбираться так, чтобы при обжатии заготовка не отставала от реборды калибра. Анализ условий обжатия перемычки показывает, что если для упрощения изготовления валков принять на этом участке постоянную ширину реборды, то в перемычке будут возникать осевые растягивающие напряжения и, следовательно, обжимаемая заготовка всегда будет прилегать к реборде калибра. Исходя из этого, при

проектировании калибровки валков ширина реборды в начале калибра принимается постоянной.

На основании принятых исходных данных определяются высоты реборд h_a и диаметры перемычек d_a на формовочном участке калибра через каждые 90° поворота оси валка (рисунок 1.20).

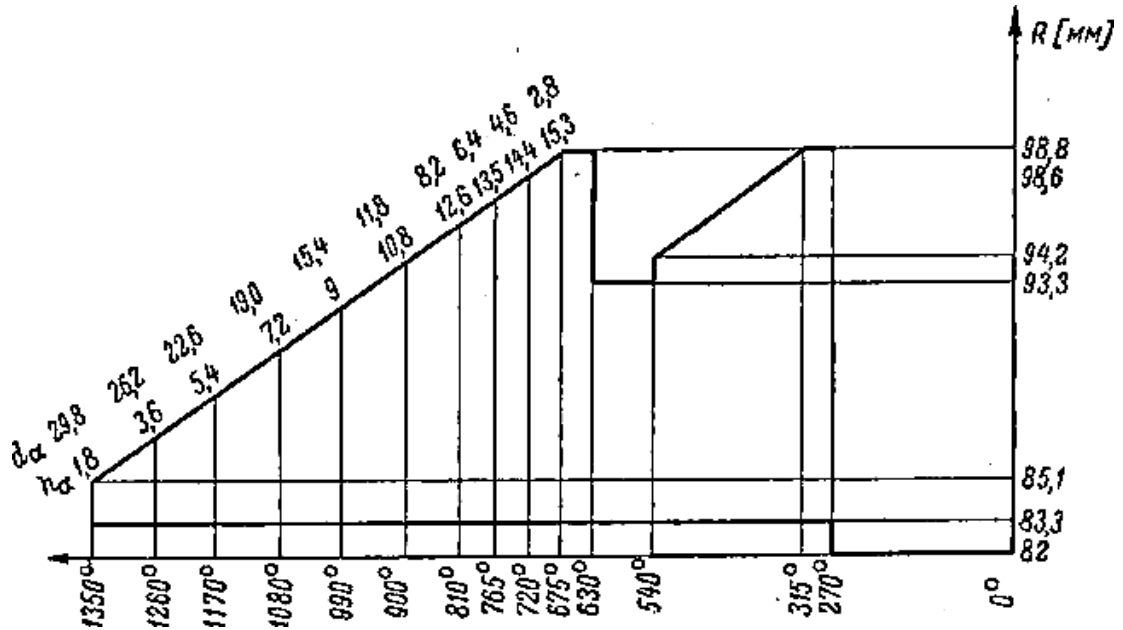


Рисунок 1.20 - График изменения высоты реборды калибра валков и диаметра перемычки между шарами для прокатки шаров диаметром $1\frac{1}{4}$ ":

d_a — диаметр пережима на заготовке; h_a — высота реборды.

Далее, в соответствии с рисунком 1.21, ширина реборды $\alpha_{\alpha-360}$ в любом произвольном сечении формирующего участка калибра равна:

$$\alpha_{\alpha-360} = t_0 - 2C_{\alpha-360} - S_{\alpha-360}; \quad (1.4)$$

здесь t_0 — шаг нарезки отделочного участка калибра, который принято называть основным шагом нарезки:

$$t_0 = 2R + \alpha_0, \quad (1.5)$$

где R — радиус калибра;

α_0 — ширина реборды в отделочном участке калибра, выбираемая по табл. 6;

$C_{\alpha-360}$ — ширина сферического участка калибра.

$$C_{\alpha-360} = \sqrt{R^2 - (R - h_{\alpha-360})^2} \quad (1.6)$$

$S_{\alpha-360}$ — величина, на которую подрезается калибр на данном участке для получения необходимой ширины реборды

На основании условия постоянства объема обжимаемого металла в любом сечении калибра и принимая во внимание обозначения на рисунке 1.21, можно написать такое равенство:

$$V_{\text{общ}} = V_{\alpha} + V_{ca} + V_{S\alpha-360} + V_{\alpha-360} + V_{C\alpha-360}, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{общ}}$ — объем прокатываемого шара и перемычки.

Вместе с тем

$$V_{\text{общ}} = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 + \frac{\pi d^2}{4} \cdot \alpha \quad (1.8)$$

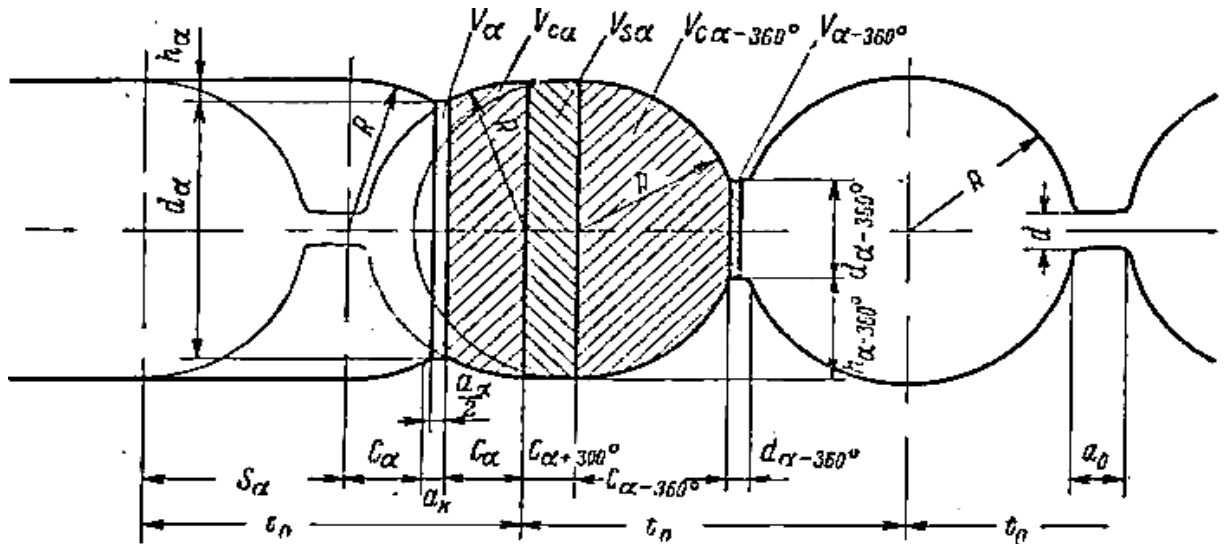


Рисунок 1.21 - Схема к выводу формулы, выражающей условие постоянства объема металла в калибре.

Элементы объема, входящие в правую часть равенства, выражаются следующими соотношениями:

$$V_\alpha = \frac{\pi \cdot d^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{2}; \quad (1.9)$$

$$V_{c\alpha} = \pi \cdot C_\alpha \left(R^2 - \frac{C_\alpha^2}{3} \right); \quad (1.10)$$

$$C_\alpha = \sqrt{R^2 - (R - h_\alpha)^2}; \quad (1.11)$$

$$V_{\alpha-360} = \frac{\pi \cdot d_{\alpha-360}^2}{4} \cdot \frac{\alpha_{\alpha-360}}{2}; \quad (1.12)$$

$$V_{c\alpha-360} = \pi \cdot C_{\alpha-360} \left(R^2 - \frac{C_{\alpha-360}^2}{3} \right); \quad (1.13)$$

$$V \cdot S_{\alpha-360} = \pi \cdot R^2 \cdot S_{\alpha-360}; \quad (1.14)$$

На основании равенства (1.4) $S_{\alpha-360}$ определяется по формуле:

$$S_{\alpha-360} = t_o - 2C_{\alpha-360} - \alpha_{\alpha-360}; \quad (1.15)$$

На основании равенства (1.7) определяется ширина реборды:

$$\alpha_{\alpha-360} = \frac{V_\alpha + V_{c\alpha} + V_{c\alpha-360} + \pi \cdot R^2 (t_o - 2C_{\alpha-360}) - V_{\text{общ}}}{\pi (R^2 - \frac{d_{\alpha-360}^2}{8})} \quad (1.16)$$

По этому равенству определяется ширина реборды на формирующем участке калибра через каждые 90° поворота оси валка. При этом нужно задаться шириной реборды на первом витке калибра и принимать высоту реборды согласно рисунку 1.21. Найденные таким путем размеры реборды на формирующем участке калибра

отвечают требованию постоянства общего объема металла в калибре. Для того чтобы проверить и скорректировать размеры реборды калибра в соответствии со вторым основным положением калибровки, согласно которому изменение размеров реборды должно соответствовать вытяжке обжимаемой заготовки, определяют длину перемычек, исходя из постоянства объема металла, обжимаемого ребордой.

Это осуществляется в такой последовательности. Согласно рисунку 1.21 на двух соседних участках калибра должно удовлетворяться равенство

$$2V_{\alpha+90} = 2V_{\alpha} + 2(V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90}) \quad (1.17)$$

Но

$$V_{\alpha} = \frac{\pi d_{\alpha}^2}{4} \cdot \frac{b_{\alpha}}{2}, \quad (1.18)$$

Принимая это во внимание, из равенства (1.17) b_{α} определяется по формуле:

$$b_{\alpha} = \frac{2V_{\alpha+90} - 2(V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90})}{\frac{\pi d_{\alpha}^2}{4}}, \quad (1.19)$$

Если найденная по этому равенству длина перемычки b_{α} меньше ширины реборды a_{α} , это означает, что металл будет соприкасаться с поверхностью калибра во всех его точках и плен на поверхности шара не будет.

Если же $b_{\alpha} > a_{\alpha}$, то между поверхностью калибра и заготовкой будет существовать зазор, в который устремится металл, образуя кольцевой накат (рисунок 1.23) и в последующем — плену. Для предотвращения указанных дефектов на шарах ширина реборды a_{α} уменьшается путем увеличения подрезки калибра (S'_{α}). При этом в калибре появляется небольшой избыток металла.

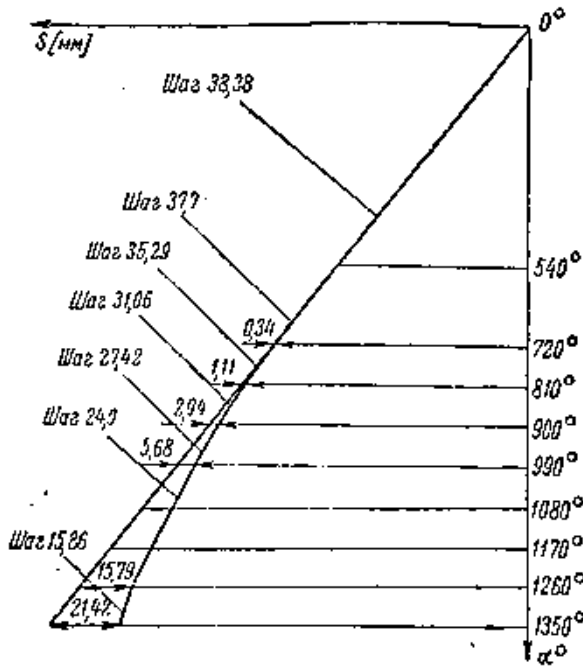


Рисунок 1.22 - График нарезки калибра валков для прокатки шаров диаметром 32 мм (1.25 дюйма).

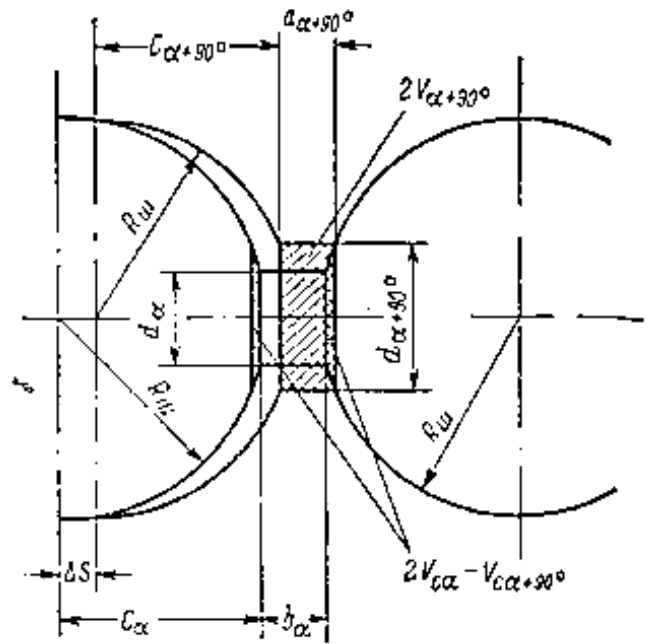


Рисунок 1.23 - Схема к выводу формулы для определения ширины перемычки

Коэффициент избытка металла в калибре определяется отношением

$$K = \frac{V_{\alpha} + V_{c\alpha} + V_{S'_{\alpha}} + V_{\alpha+360} - V_{c\alpha+360}}{V_{\text{общ}}}; \quad (1.20)$$

где $V'_{S'_{\alpha}}$ — объем цилиндрического участка калибра, подсчитанный по величине развалки калибра S'_{α} .

Согласно имеющимся опытным данным небольшой избыток металла в начале калибра допустим ($k_{\text{max}} \leq 1,2$). Но на протяжении одного витка избыток металла обязательно должен быть сведен к нулю ($K = 1,0$). После уточнения размеров калибра подсчитываются шаги подрезки на отдельных участках калибра по формуле

$$t_{\text{подр}} = t_o - \frac{S_{\alpha+90} - S_{\alpha}}{90} \cdot 360; \quad (1.21)$$

где S_{α} и $S_{\alpha+90}$ — величины развалки на соседних участках калибра, определяемые по равенству

$$S_{\alpha} = t_o - 2C_{\alpha} - \alpha_{\alpha}; \quad (1.22)$$

Полученные расчетным путем, шаги нарезки уточняются в соответствии с паспортными данными токарно-винторезного стана, на котором будет нарезаться калибр, после чего строится график нарезки калибра (рисунок 1.22) [51].

Упрощение калибровки валков поперечно винтовой прокатки

ВНИИМЕТМАШ предложил упрощение калибровки и технологии изготовления многозаходных валков для прокатки шаров [52].

Технология изготовления на токарно-винторезных станках валков с винтовыми калибрами для прокатки шаров включает следующие основные операции: нарезку винтовых ручьев, поперечную подрезку («затыловку») реборды на формующем участке валков, наружную подрезку реборды на том же участке.

Поперечная подрезка обеспечивает изменение высоты реборды от высоты h_3 в сечении захвата до высоты h_0 на отделочном участке калибра по закону прямой линии в зависимости от угла поворота винтовой линии калибра. Это дает возможность исходя из принятых значений h_3 , h_0 и протяженности формующих участков калибров определить высоту реборды в любом контрольном сечении.

Полученные значения высоты реборды используются для вычисления ширины a реборды в тех же контрольных сечениях на основе выполнения условия постоянства объема металла на всем протяжении калибра.

Угол наклона образующей (рисунок 1.28) определяется по формулам

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{h_0 - h_3}{L}; \quad (1.23)$$

$$L = t_{\text{ср}} \cdot \frac{\sum \alpha_{\phi}}{360} - C_0 + C_{\phi} \quad (1.24)$$

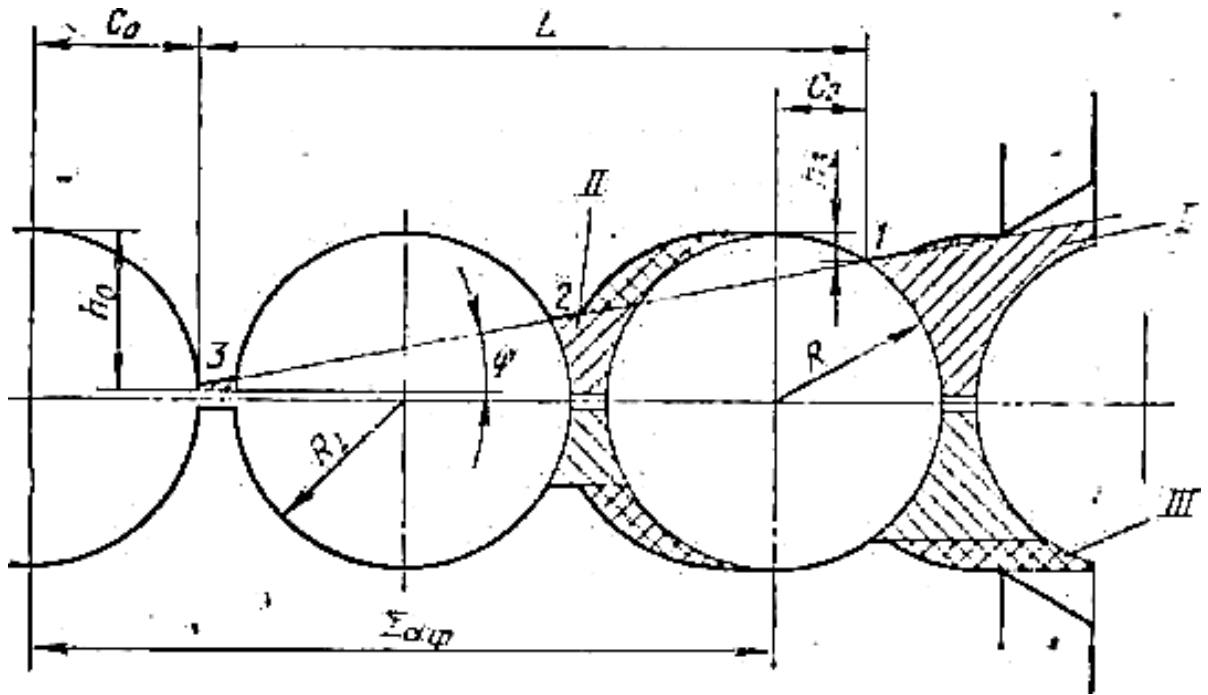


Рисунок. 1.24 - Продольное сечение винтового калибра:

I — поперечная подрезка; *II* — проточка на конус; *III* — наружная подрезка

где t_{cp} — шаг нарезки ручьев на формирующем участке валков;

$\Sigma\alpha_{\phi}$ — протяженность формирующего участка калибра в градусах.

При этом принимается, что образующая должна проходить через передние точки вершин реборды (точки 1, 2, 3, рисунок 1.24), а высота реборды должна равняться возвышению указанных точек над уровнем дна калибров.

Для упрощения выводов можно вместо продольных сечений валков рассматривать сечение реборды, наложив все контрольные сечения одно на другое (рисунок 1.25).

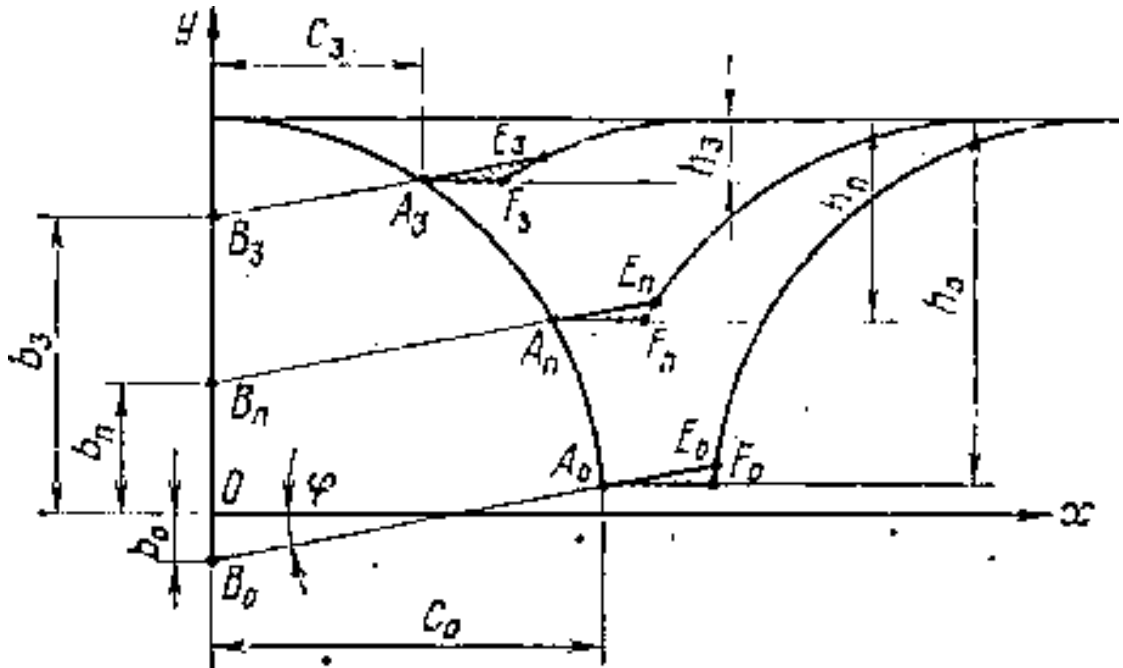


Рисунок 1.25 - Совмещенные контрольные, сечения реборды

В соответствии с рисунком 1.34 для любого контрольного сечения уравнение очертаия ручья определяется:

$$y = \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (1.25)$$

и уравнению образующей

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi + b_n, \quad (1.26)$$

где b_n — ордината точки пересечения образующей с осью ручья oy в рассматриваемом контрольном сечении.

Из уравнений (1.25) и (1.26) радиус перемычки в любом контрольном сечении определяется по формуле:

$$r_\alpha = y = \frac{b_n + \operatorname{tg} \varphi \cdot R^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) + b_n^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (1.27)$$

Учитывая, что величина b_n изменяется прямо пропорционально углу поворота винтовой линии калибра, определяется ее значение по формуле

$$b_n = b_0 + \frac{(b_3 - b_0)n}{m}, \quad (1.28)$$

где $b_n = r_0 + C_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi$;

$b_3 = r_3 - C_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi$;

m — количество интервалов между контрольными сечениями на всем протяжении формирующего участка калибра;

n — количество интервалов от начала отделочного участка до рассматриваемого контрольного сечения.

Полученные значения r_α служат для расчета остальных элементов многозаходной калибровки валков. При этом условно принимается, что вершины реборды ограничены не отрезками образующих AE , а отрезком AF , который и определяет ширину реборды.

Таким образом, расчетный объем металла в каждом контрольном сечении меньше фактического объема на величины, соответствующие заштрихованным треугольникам AFE (рисунок 1.25).

Указанное искажение расчетной схемы довольно незначительно и, как показала практика, не влияет на качество калибровки валков.

Расчет калибровки валков можно значительно упростить, если формулы (1.27), (1.28) заменить графическим построением, которое выполняется следующим образом (рисунок 1.26) [48].

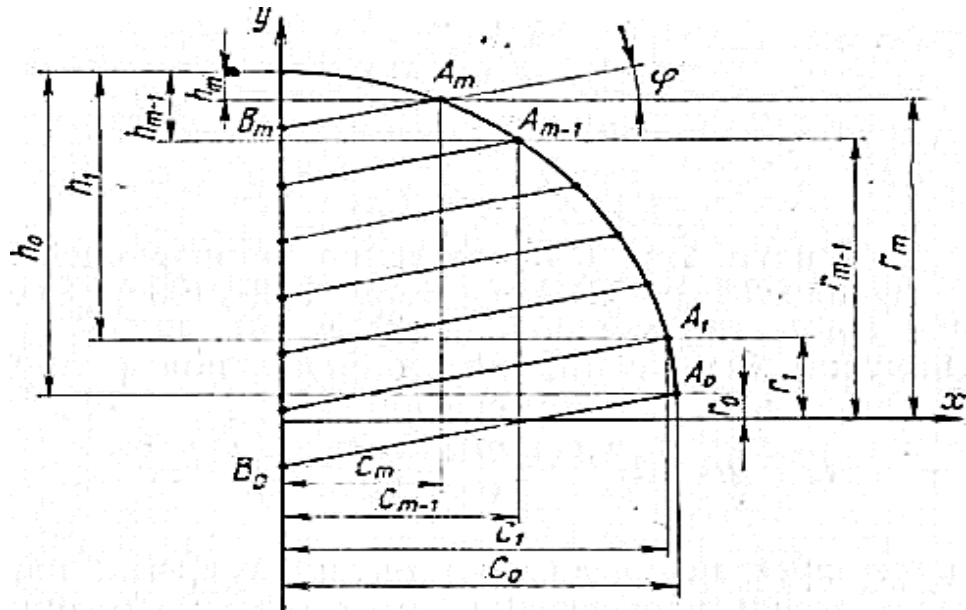


Рисунок 1.26 - Графическое определение радиусов перемычек, высот и длин радиусных частей реборд

Строится ось координат x_{oy} . Проводится дуга окружности с центром в точке o радиусом R , равным радиусу сечения калибра. Параллельно оси ox на расстоянии r_0 и r_1 проводятся прямые, которые пересекут дугу в точках A_0 и A_m . Через эти точки проводятся параллельные прямые под углом φ к оси ox до пересечения в точках B_0

и B_m с осью o_y . Отрезок B_0 и B_m делятся на m равных частей и через точки деления проводятся прямые, параллельные линиям A_0B_0 , до пересечения с дугой окружности. Координаты полученных точек пересечения определяют искомые радиусы перемычек r_α и длины сферических частей C_α в соответствующих контрольных сечениях.

Графический метод позволяет получить результаты с достаточной степенью точности. Так, при масштабе построения 10:1 (что практически осуществимо для шаров диаметром 40, 50 и 60 мм) искомые размеры можно получить с точностью $\pm 0,05$ мм.

Предложенный метод упрощает расчет калибровки и технологию изготовления валков с многозаходными винтовыми калибрами для прокатки шаров, может применяться и для однозаходных валков.

В результате замены поперечной подрезки проточкой формующих участков валков на конус сокращено время изготовления валков и токари освобождены от применения значительных физических усилий, требовавшихся при продольной подаче [52].

Многозаходная калибровка валков для прокатки шаров [53]

При расчете калибровки диаметр и длину перемычки на отдельном участке калибра, высоту и ширину реборды на участке захвата определяли так же, как и при расчете однозаходного калибра по опытным данным, но при расчете однозаходного калибра исходили из ширины реборды на протяжении первого ее витка со стороны захвата, а при многозаходной калибровке — на протяжении $1/z$ витка (или $360^\circ/z$), где z -число заходов.

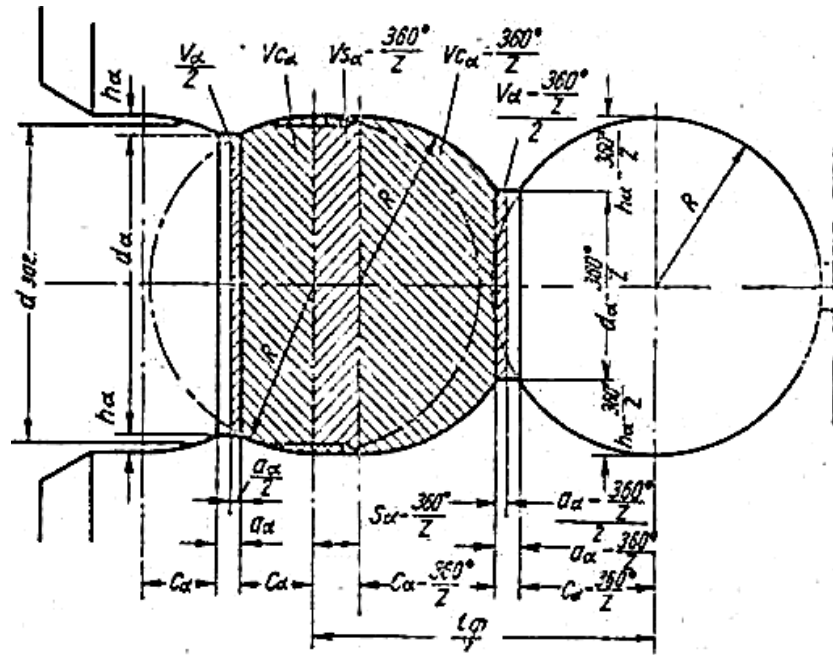


Рисунок 1.27 - Расчет калибра в момент захвата заготовки

Общая протяженность реборды определяется по шагу нарезки отделочного участка калибра:

$$\sum \alpha = \frac{L - (20 - 30)}{t_0} \cdot 360, \quad (1.29)$$

где L — длина бочки валка;

t_0 — шаг нарезки отделочного участка калибра;

20—30 — длина конусной проточки на валке со стороны захвата для облегчения задачи заготовки в валки, мм.

Полученное значение протяженности реборды округляется до ближайшей величины, кратной интервалу между контрольными сечениями. Величина интервала принимается: для двухзаходных валков $\Delta\alpha = 90^\circ$; для трехзаходных валков $\Delta\alpha = 60^\circ$; для четырехзаходных валков $\Delta\alpha = 45^\circ$.

Протяженность формирующего участка реборды принимается равной половине общей длины реборды либо больше на один интервал.

По значению принятой длины формирующего участка реборды и исходным данным строится график изменения высоты реборды и определяется ее высота, радиусы перемычек, длина сферических частей и их объемов в контрольных сечениях. Затем определяется шаг нарезки формирующего участка калибра (рисунок

1.27) по формуле

$$t' = \frac{t_\Phi}{z} = 2C_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}} + \alpha_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}} + S_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}} \quad (1.30)$$

Длину цилиндрического участка определяют, исходя из условия постоянства объема металла в калибре, по формуле:

$$S_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}} = \frac{(1.03 - 1.05) \cdot V_k - \left(\frac{V_\alpha}{2} + V_{C_\alpha} + V_{C_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}}} + \frac{V_{\alpha - \frac{360^\circ}{z}}}{2} \right)}{\pi R^2} \quad (1.31)$$

в которой ширина реборды на участке захвата от α и до $\alpha - \frac{360^\circ}{z}$ принимается, по аналогии с однозаходными калибрами, постоянной и равной 1,8—3,5 мм в зависимости от размера прокатываемого шара; V_k — объем готового шара и перемычки.

Коэффициент 1,03—1,05 учитывает незаполнение калибра металлом (на рисунке 1.26 дважды заштрихованные участки) в момент захвата из-за того, что диаметр заготовки меньше диаметра калибра.

При калибровке многозаходных валков формующий участок калибра необходимо нарезать формующим шагом, а отделочный участок — основным шагом. При рассмотрении развертки поверхности вала (рисунок 1.28) выявляют, что точки перемены шагов в соседних калибрах отстоят друг от друга на $\frac{360^\circ}{z}$, и реборда каждого калибра оказывается расположенной на трех участках; формующем, на котором, расстояние между осями смежных калибров постоянно и равно $t'_\alpha = \frac{t_\Phi}{z}$; переходном, на котором, расстояние между смежными калибрами изменяется $t'_\alpha = \left(\frac{t_\Phi}{z} \div \frac{t_0}{z} \right)$, протяженность этого участка равна $\frac{360^\circ}{z}$; отделочном, на котором расстояние между осями смежных калибров также постоянно и равно $t'_\alpha = \frac{t_0}{z}$.

участке и расстояние между осями смежных калибров для него должно быть больше, чем в предыдущем сечении, на величину разности ширин реборд, т. е.

$$t'_\alpha = \frac{t_\phi}{z} + \Delta \cdot t'_\alpha, \quad (1.34)$$

где $\Delta \cdot t'_\alpha = \alpha_{\alpha+\Delta\alpha} - \alpha_\alpha$

Положение точки перемены шагов определяют по формуле

$$\alpha_{п.ш} = \alpha + \frac{\Delta \cdot t'_\alpha}{t_o + t_\phi} 360^\circ - \frac{360^\circ}{z}, \quad (1.35)$$

Расчет длин цилиндрических участков калибра и шагов подрезки производится так же, как и при однозаходной калибровке с той разницей, что в формулы вместо основного шага t_o подставляется соответствующая величина t'_α или t_ϕ .

Наличие небольшого избытка объема в начале калибра на протяжении $\frac{360^\circ}{z}$ должно быть сведено к нулю так как благоприятные условия для работы валков и проводок создаются в том случае, если в калибре нет избытка металла.

Применение предложенного метода позволяет заметно упростить расчет многозаходных винтовых калибров, обеспечивая получение шаров достаточно правильной формы [53].

1.6 Выводы, постановка цели и задач исследования

На основании проведённого аналитического обзора можно сделать следующие выводы.

1. Многие отечественные и зарубежные потребители, занимающиеся обработкой твердых руд цветных металлов, предъявляют требования к высокой прочности, твердости и износостойкости мелющих шаров. Основные технические требования и характеристики регламентируются в ГОСТ 7524-2015.

Компании зарубежных стран производят мелющие шары в основном (с использованием круглой заготовки из высокоуглеродистой стали) с применением

специальной технологии нагрева, прокатки иликовки и термообработки. Целью всего этого является получение оптимального износа шаров и повышенной ударопрочности при применении.

Следуя мировому опыту, который подтверждает, что именно высокая твердость, равномерно распределенная по сечению, обеспечивает повышенную износостойкость мелющих шаров, некоторые заводы-изготовители пытаются осуществлять «сквозную» закалку шаров и добиться более равномерного распределения твердости по сечению выше. Растущие требования потребителей к эксплуатационным показателям качества мелющих шаров предполагают ввод новых технологических процессов производства шаров повышенной объемную твердость.

2. Основной методикой расчета калибровки прокатных валков шаропрокатного стана является методика разработанная ВНИИМЕТМАШ. Концепция расчета основывается на принципе деления витков калибра на формующий и отделочный участки. Нормальный процесс прокатки должен обеспечиваться условиями постоянства объема металла в калибре, оптимальным соотношением вытяжки и обжатий. Соблюдение указанных условий должно обеспечить прокатку шаров правильной геометрической формы без плен, накатов и рыхлости при минимальном расходе энергии на деформацию. При прокатке шаров условия, препятствующие образованию рыхлости внутри заготовки, наиболее благоприятны, так как обжатие ведется сравнительно узкими участками, сферические участки заготовок не подвергаются обжатию и сдерживают раскатку перемычек в поперечном направлении.

3. При введении новых современных мощностей необходимо прорабатывать новые технологические процессы с целью получения стабильного процесса производства мелющих с повышенными прочностными и эксплуатационными свойствами. Одним из основных параметров процесса прокатки является распределение температурных полей и равномерность удельных обжатий при прокатке мелющих шаров высокой твердости. Усилия обжатия можно оценить моделированием, исходя из зависимости распределения деформации, напряжений

и температурных полей на поверхности и по сечению шара. Необходима проработка рациональных процессов прокатки мелющих шаров из специальных легированных сталей, режимов термической обработки.

Сравнительный анализ технологии отечественных и зарубежных производителей мелющих шаров показывает, что на АО «ЕВРАЗ НТМК» введенный в эксплуатацию новый участок шаропрокатного стана ШПС РБЦ с современным оборудованием и имеет потенциал для производства шаров повышенной объемной твердости. Действующая технология ШПС КСЦ не позволяет получить мелющие шары диаметром 100 мм повышенной твердости. Для проработки потенциальных технических возможностей ШПС РБЦ необходимо проводить исследовательские изыскания.

Целью диссертационной работы является исследование, совершенствование и внедрение рациональных технологических режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров с повышенной объемной твердостью на основе физического и компьютерного моделирования для улучшения эксплуатационных характеристик.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

- осуществить постановку и решение краевой задачи МКЭ для оценки напряженно-деформированного состояния. С помощью программного комплекса Deform 3D осуществить компьютерное моделирование процесса двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм по действующей калибровке с целью выявления недостатков и определения путей совершенствования;

- на основе методики расчета калибровки прокатных валков шаропрокатного стана ВНИИМЕТМАШ разработать новую калибровку валков двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм с целью исключения выявленных недостатков, позволяющую получать мелющие шары требуемого качества;

- для оценки разработанной калибровки, с помощью программного комплекса Deform 3D, осуществить компьютерное моделирование процесса двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм;

- осуществить опробование и внедрение новой калибровки валков двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм в условиях ШПС РБЦ АО «ЕВРАЗ НТМК»;

- провести анализ и разработать математические модели рациональных настроечных параметров прокатки мелющих шаров на шаропрокатном стане, позволяющие обеспечить стабильный процесс прокатки мелющих шаров требуемого качества;

- с помощью программного комплекса Deform 3D осуществить компьютерное моделирование процесса термической обработки мелющих шаров диаметром 100 мм и разработать технологический процесс режимов закалки и отпуска с целью получения показателей 5 группы твердости по [5].

- осуществить опробование и внедрение режимов термической обработки мелющих шаров диаметром 100 мм в условиях ШПС РБЦ АО «ЕВРАЗ НТМК».

2 ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОПЕРЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

2.1 Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных марок стали

Решение краевой задачи процесса пластической деформации предполагает определение напряжённого и деформированного состояния в любой момент времени и в любой точке обрабатываемого тела. При этом напряжённое состояние описывается тензором напряжений, а деформированное состояние функциями траекторией перемещения всех материальных частиц, из которых состоит тело. Расчёт напряжённо-деформированного состояния (далее по тексту – НДС) является трудной вычислительной задачей, поэтому наиболее оптимальным и точным на сегодняшний день методом является математическое моделирование с использованием специальных пакетов программ и электронно-вычислительной техники. Математическое моделирование эффективно используется для анализа процессов обработки металлов давлением (далее по тексту – ОМД). Наиболее развитым и активно используемым способом математического моделирования процессов деформации является метод конечных элементов (МКЭ), он успешно зарекомендовал как инструмент для анализа и оптимизации процессов прокатки. Основными направлениями анализа являются: процессы формоизменения, энергосиловые параметры деформации, определение в металле полей напряжений, температуры, скорости и степени деформации [54].

Объём деформируемого тела разбивается на элементы конечной, но малой величины. Разбиение на конечные элементы позволяет упростить задачу, представив непрерывные функции искомых механических переменных деформируемого тела с бесконечным числом значений в виде конечных рядов значений этих функций. Значения функций определяют в узлах конечных элементов, а внутри самих элементов функция интерполируется в виде какой-либо

известной функции, например, линейной. Значения в узлах сетки ищутся с использованием вариационных принципов.

В настоящей работе для исследования НДС процесса прокатки шаров использован программный комплекс Deform V12.1 (лицензия АО «ЕВРАЗ НТМК»), для создания геометрии процесса была выбрана САД-система Solid Works V10 (лицензия АО «ЕВРАЗ НТМК»).

Создание модели и анализ НДС горячей прокатки мелющих шаров способом поперечно-винтовой прокатки необходимы для исследования и оптимизации технологии производства мелющих шаров диаметром 100 мм, применяемой в настоящее время на отечественных промышленных предприятиях.

В настоящей работе рассматривается процесс двухзаходной прокатки шаров (рисунок 2.1) из легированной стали марки 65С2Х.

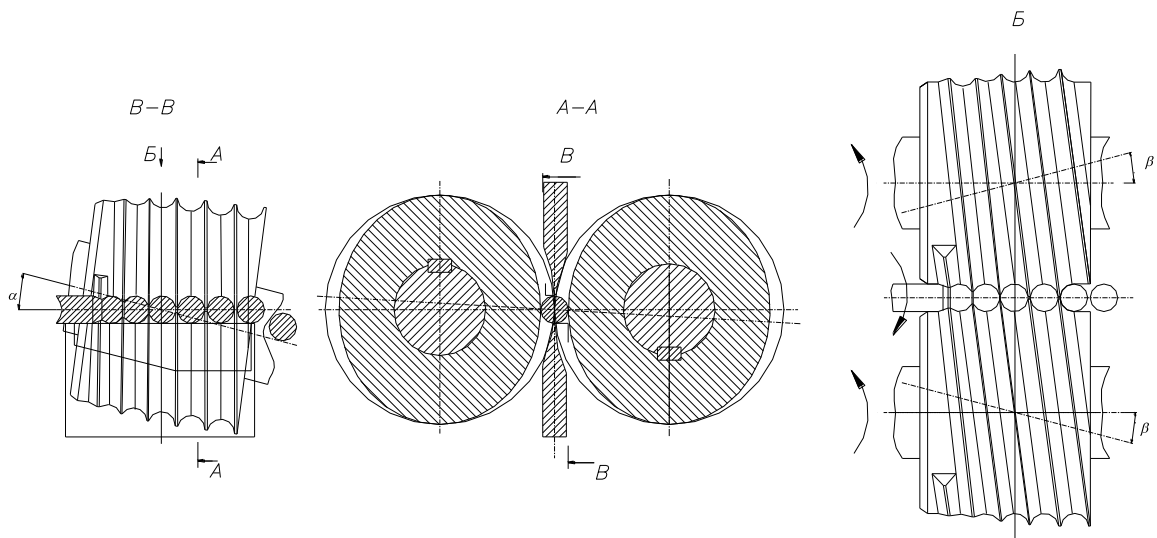


Рисунок 2.1 – Схема прокатки мелющих шаров

Мелющие шары прокатывают из горячекатаных круглых заготовок диаметром 100 мм, точности прокатки В2 по ГОСТ 2590-2006 [55].

Как показывает опыт эксплуатации шаропрокатных станов, кроме единичного обжатия на разрыхление металла при поперечной прокатке в винтовых калибрах влияют: ширина реборды калибра, натяжение металла в обжимаемой части заготовки, температура прокатки, скорость вращения валков, сопротивление деформации и наличие избытка металла в калибре.

При проектировании и изготовлении валков с винтовыми калибрами необходимо стремиться сохранить постоянство объема металла по всей длине калибра. Это особенно важно в тех случаях, когда форма изделия способствует разрыхлению металла, так как его избыток в калибре приводит к интенсивной раскатке заготовки в радиальном направлении, которая сопровождается разрушением осевой зоны изделия.

На отделочном участке при прокатке шаров осуществляется только калибровка шара. Этот участок имеет переменный шаг и профиль нарезки, соответствующий профилю прокатываемого шара и постоянный угол подъема нарезки, равный углу наклона валков.

При прокатке мелющих шаров валок отличается наличием калибрующего участка, выравнивающего диаметры заготовок перед формовкой и удлиненным отделочным участком. Небольшое осевое смещение валков приводит к разрыву перемычки в начале отделочного участка, а затем - вращению шара относительно оси, перпендикулярной оси прокатки, срезу перемычек ребордами и закатке полюсных выступов.

Постановка задачи по моделированию процесса прокатки

Параметры прокатываемой заготовки: диаметр 100 мм, длину заготовки выбрали 1 м. В промышленных условиях диаметр заготовки в среднем на 2-3 мм больше, длина заготовки 6000 мм \pm 100 мм. Длину заготовки искусственно сокращали для уменьшения количества конечных элементов, участвующих в расчете.

Для определения НДС на модели заготовки задали сетку конечных элементов с минимальным их размером, что позволяет описать все конструктивные особенности заготовки в САЕ-системе Deform V12.1. В заготовке была создана сетка из тетрагональных конечных элементов общим числом 40 000 – 120 0000 в зависимости от этапа моделирования (рисунок 2.2).

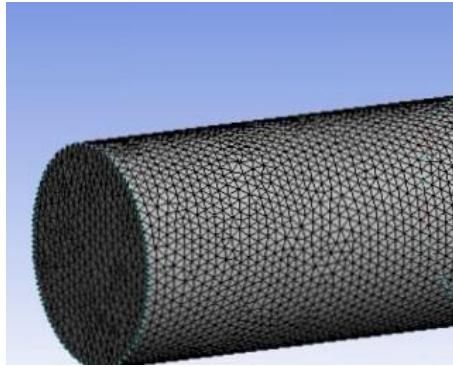


Рисунок 2.2 – Модель заготовки диаметром 100 мм

Твердотельные модели валков создавали при помощи САД-системы Solid Works. Деформирующий инструмент – идеально жёсткий. Модель показана на рисунке 2.3.

Step -1 0



DEFORM

Рисунок 2.3 – Модель прокатного валка для мелющих шаров

Для процесса моделирования выполнили позиционирование прокатных валков и исходной заготовки согласно схеме, приведенной на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Позиционирование прокатных валков и заготовки

Настройку параметров расположения валков выбирали по установленным параметрам прокатки в условиях действующего производства: вертикальный угол наклона валков $\beta = 4,5^\circ$, межосевое расстояние между валками на входе 698 мм, межосевое расстояние между валками на выходе 694 мм, расстояние между ребрами 13 мм [56-57].

В условиях действующего производства нагрев заготовки осуществляется в газовых печах до температур 950-1050 °С. Температуру исходной заготовки при моделировании приняли 1030 °С. Частоту вращения валков задали 45 об/мин, что соответствует условиям промышленной прокатки.

Механические свойства материала заготовки сгенерировали в программном модуле JMatPro по химическому составу стали марки 65C2X (рисунки 2.5-2.7), используемой для получения шаров группы твердости 5 по ГОСТ 7524-2015 [57-59]. Strain Rate – скорость деформации.

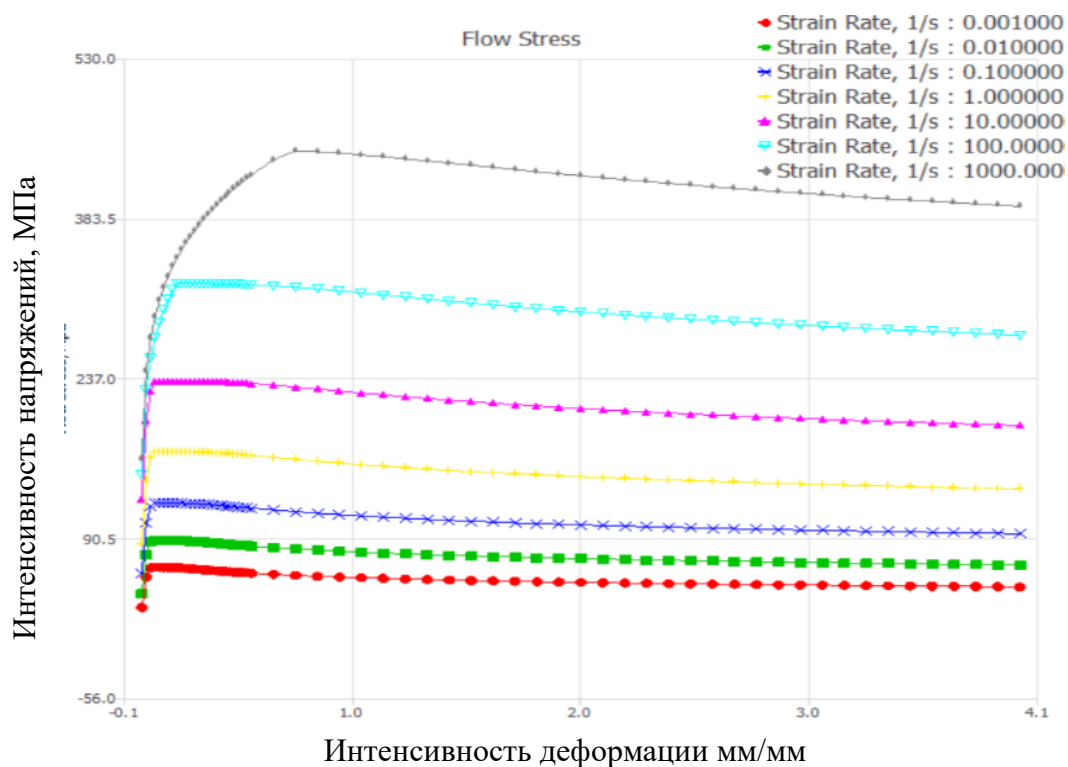


Рисунок 2.5 – Кривые упрочнения материала для стали 65С2Х при температуре 900 °С.

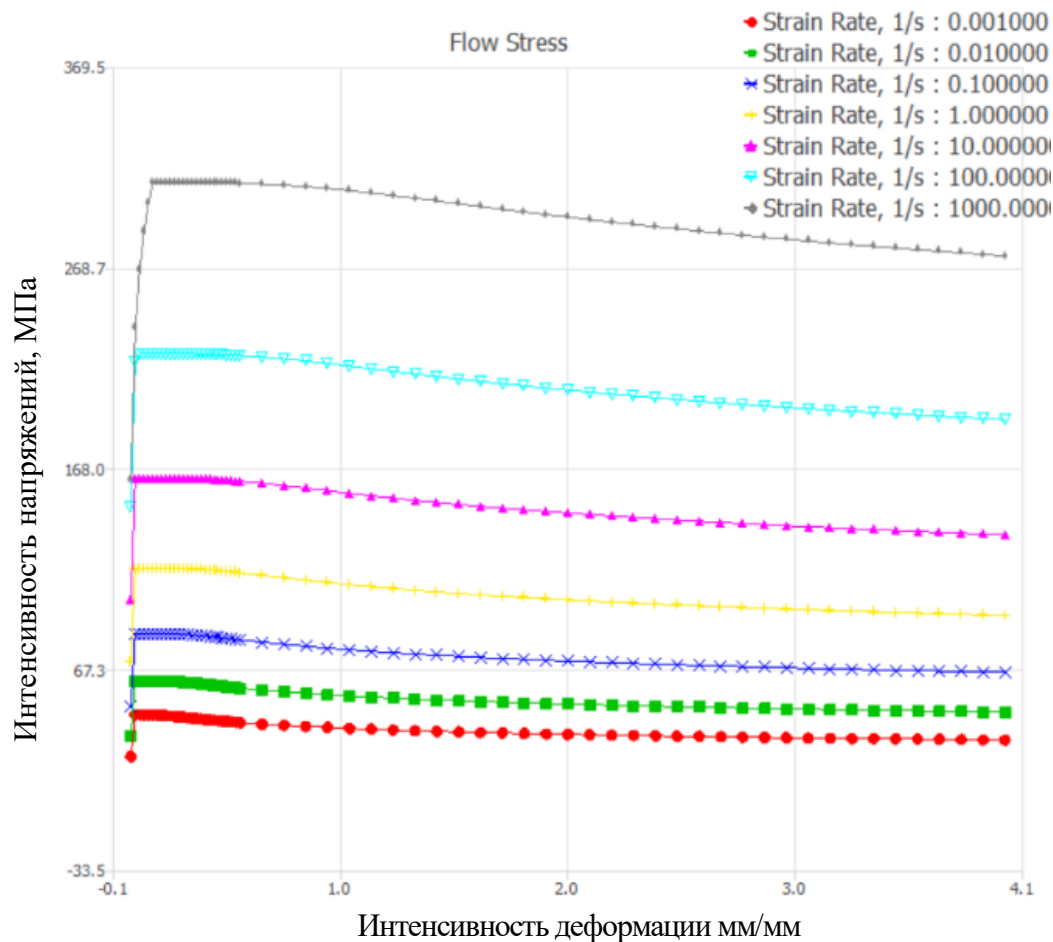


Рисунок 2.6 – Кривые упрочнения материала для стали 65С2Х при температуре 1000 °С.

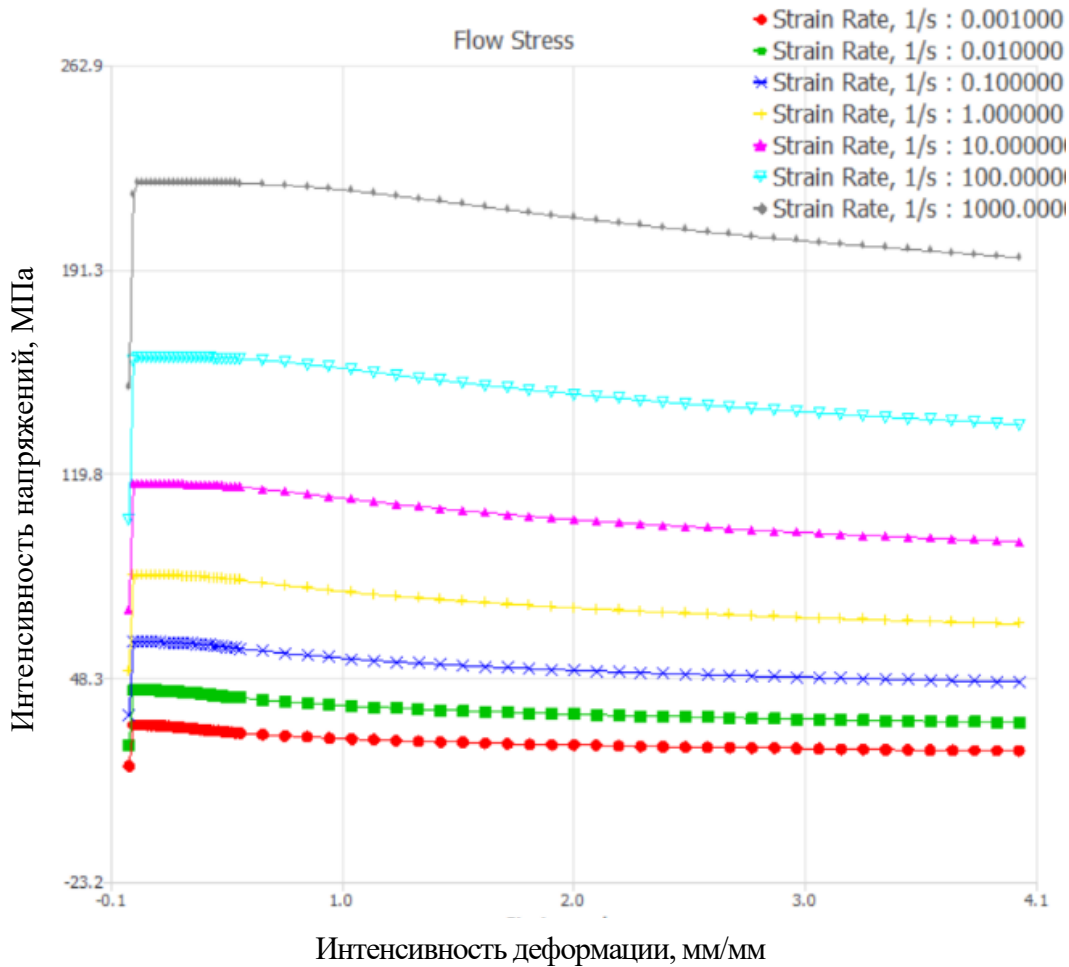


Рисунок 2.7 – Кривые упрочнения материала для стали 65С2Х при температуре 1100 °С.

Граничные условия на границе валок-полоса задавали в виде закона контактного трения, описываемого условием Зибеля:

$$\tau = \psi \tau_s, \quad (2.1)$$

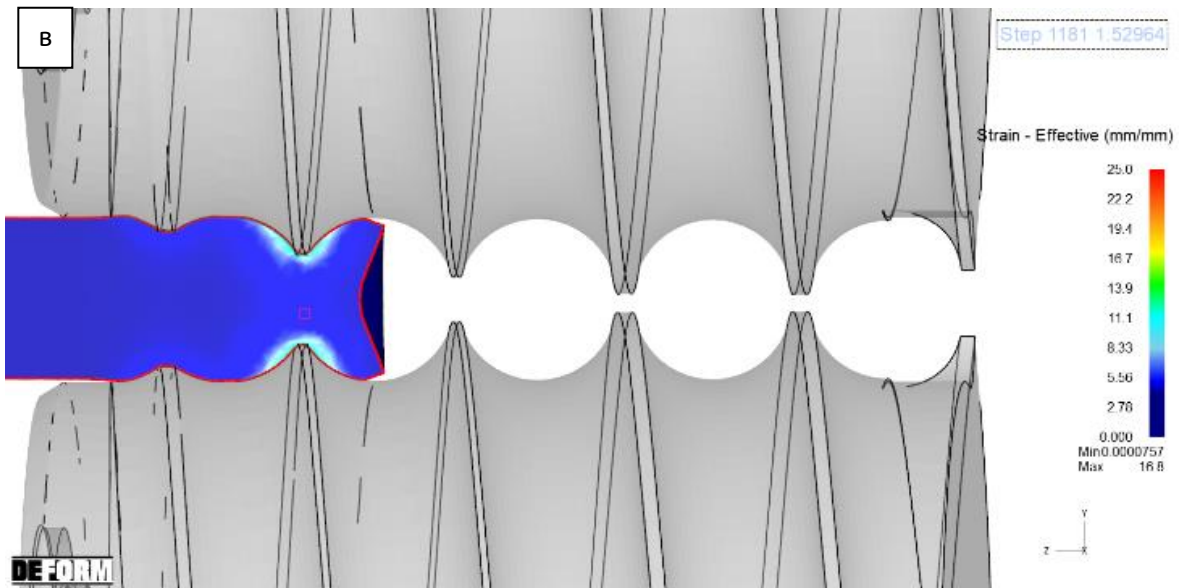
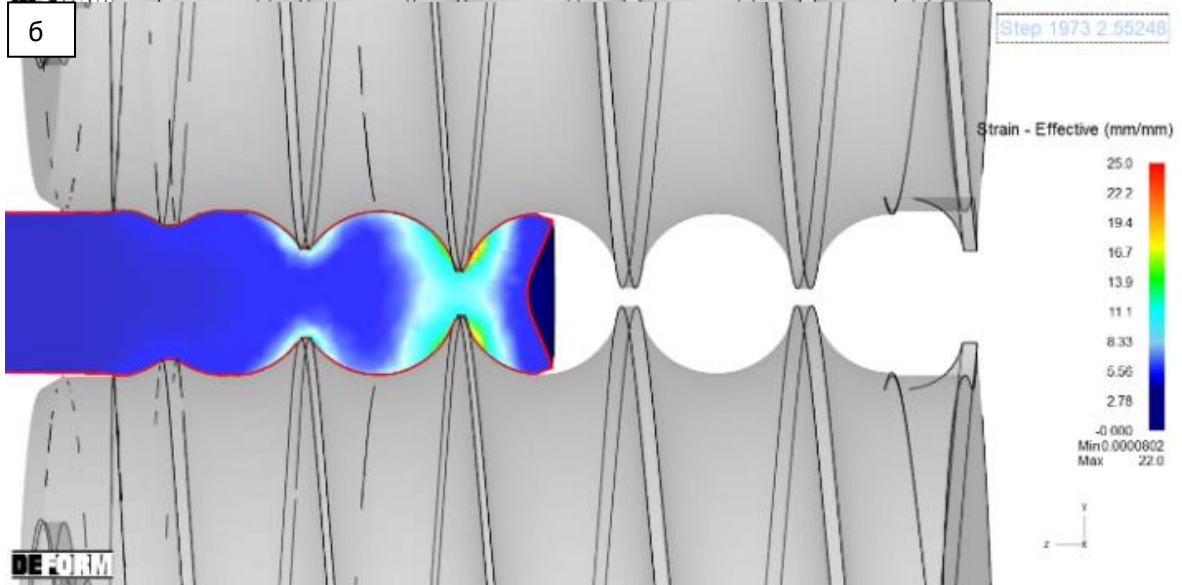
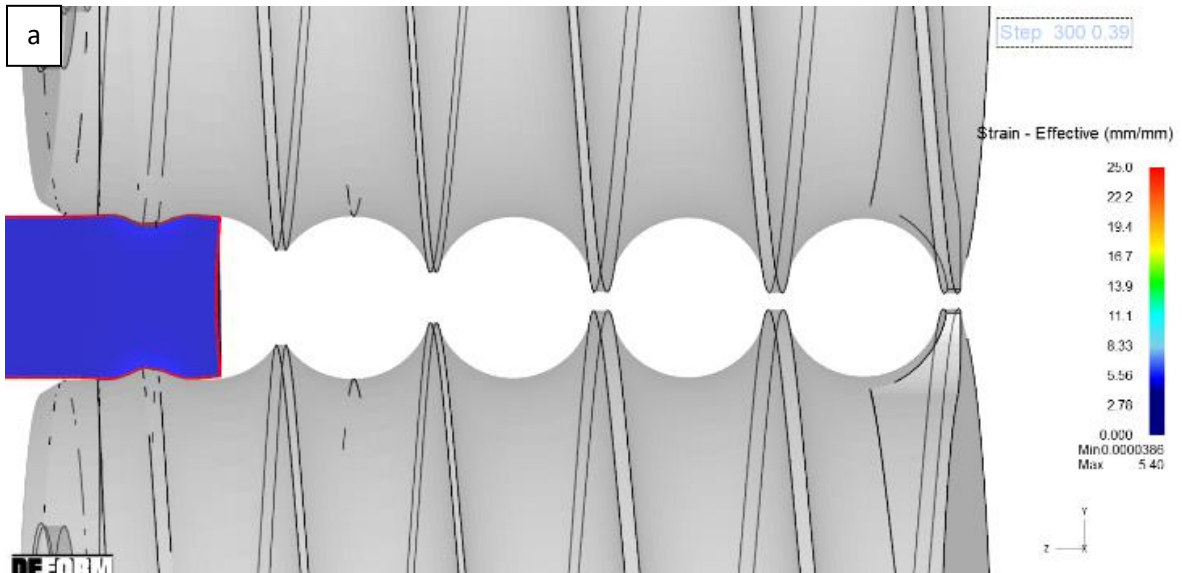
где, τ – напряжения трения; ψ – показатель трения; τ_s – сопротивление металла деформации сдвига. При моделировании приняли показатель трения 0,7 для процесса горячей прокатки.

Решение температурной задачи потребовало задания соответствующих граничных условий. Использовались граничные условия третьего рода. При этом приняты: коэффициент теплоотдачи между полосой и рабочими валками во время деформации – $k = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а для свободной поверхности – $k = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; температура окружающей среды $t = 20 \text{ °С}$.

Результаты моделирования

Формообразование изделий при поперечной прокатке в винтовых калибрах осуществляется постепенным обжатием вращающейся заготовки. Допустимая величина единичного обжатия за половину оборота заготовки обуславливается условиями её захвата валками. Чтобы заготовка вращалась, должно быть выдержано условие равновесия прикладываемых к ней крутящих моментов. Соотношение между моментом, возникающим вследствие сил трения, приложенных к заготовке, вызывающим ее вращение и моментом, создаваемым нормальной силой, действующей на заготовку, определяется величиной обжатия за половину оборота заготовки [60-62]. Таким образом, для обеспечения захвата заготовки валками расстояние между валками на входе должно превышать значения, соответствующего диаметру заготовки.

На формующем участке осуществляются захват заготовки и её постепенное обжатие в шар, соединенный перемычкой с остальной частью заготовки (рисунок 2.8, а-в). Формовка производится ребордами, имеющими непрерывно нарастающую высоту, в соответствии с которой изменяется диаметр перемычки. При существующей схеме прокатки, смещение металла из перемычек в шар приводит к радиальной деформации и увеличению диаметра шара по сравнению с диаметром заготовки, что приводит к повышенному износу реборд и образованию дефекта наката металла в осевой зоне шара «шапка».



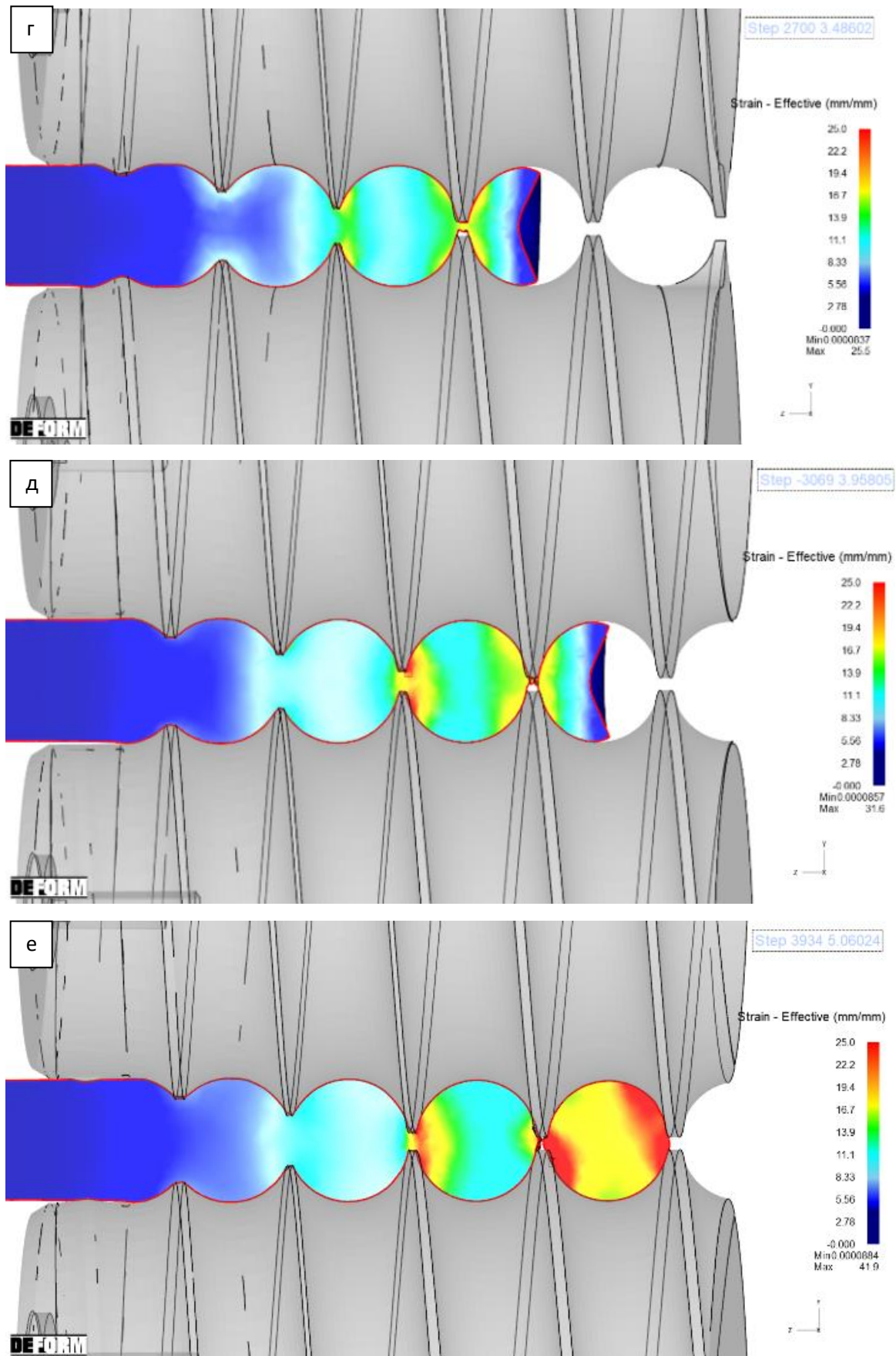


Рисунок 2.8 – Интенсивность деформации при прокатке шаров диаметром 100 мм

На отделочном участке (рисунок 2.8, г-д) при прокатке шаров осуществляется только калибровка шара. Этот участок имеет шаг и профиль нарезки, соответствующий профилю прокатываемого шара и постоянный угол подъема нарезки, равный углу подачи валков. За один оборот валков прокатывается два шара [63].

При анализе процесса формоизменения определено, что максимальные значения интенсивности деформации возникают при минимальном размере перемычки между шарами (рисунок 2.8, е). Интенсивность деформация при расчете составила 41,9 мм/мм.

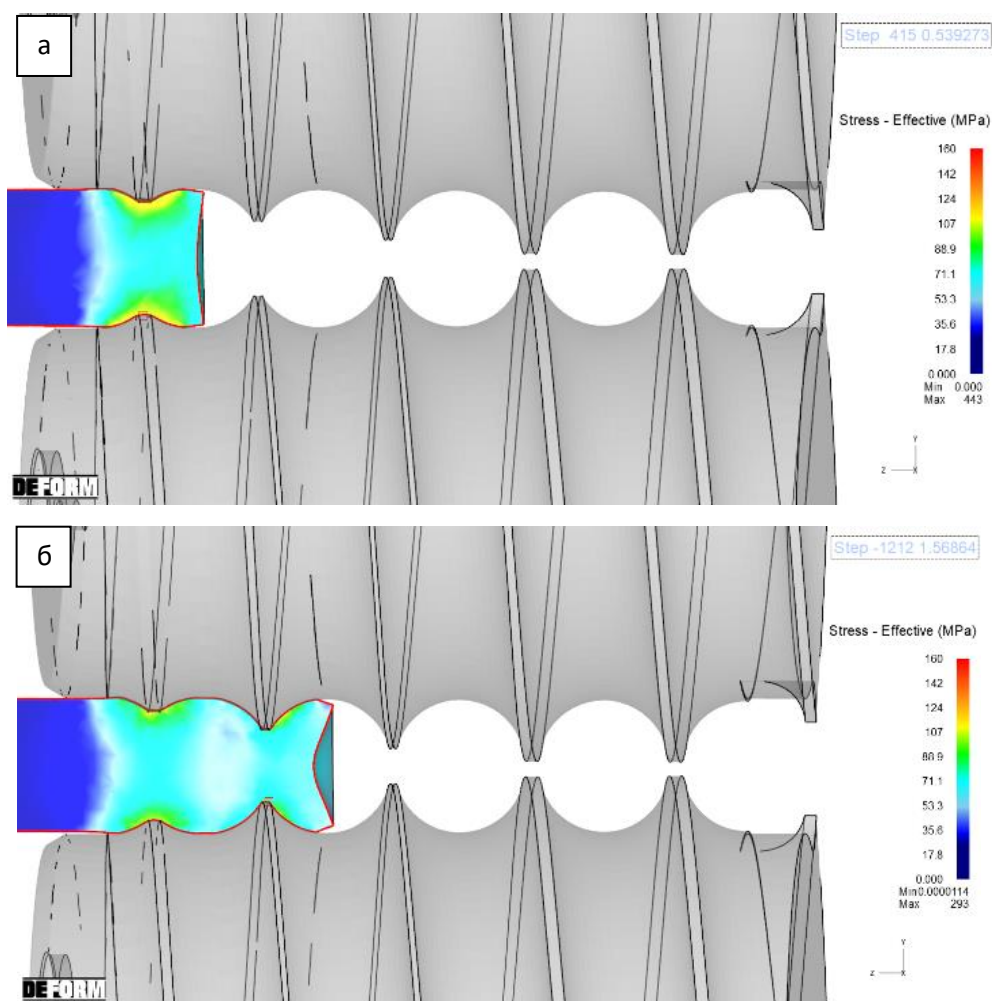
Процесс прокатки мелющих шаров характеризуется образованием на переднем конце раската так называемой «половинки». Процесс образования и формирования «половинки» четко веден на рисунках 2.8, б-д. Форма и размеры «половинки», полученной в ходе моделирования, соответствуют концевой обрезе при промышленных прокатках (рисунок 2.9).

После отделения «половинки» на шаре остается перемычка, которая в дальнейшем закатывается в тело шара (рисунок 2.8, е), который после отделения от заготовки на последнем обороте валка вращается вокруг оси, не совпадающей с начальной осью заготовки.



Рисунок 2.9 – «Половинка», получаемая в условиях промышленного производства

На рисунке 2.10 представлена интенсивность напряжений в каждой элементарной ячейке сетки (Stress – Effective), возникающих в процессе прокатки и их расположение по поверхности заготовки. Рассмотрение процесса начнем с момента захвата заготовки валками (рисунок 2.10, а). При контакте заготовки с валком возникают точечные напряжения (порядка 178-293 МПа, при пиковых значениях 443 МПа), которые вызваны воздействием валков на заготовку при ее захвате. Кроме того, значительная величина напряжений связана с малой площадью контакта заготовки с валком в момент врезки реборды валка в заготовку. Полученная в результате моделирования картина напряжений, предполагает интенсивный износ валков в зоне захвата, что подтверждается производственной практикой.



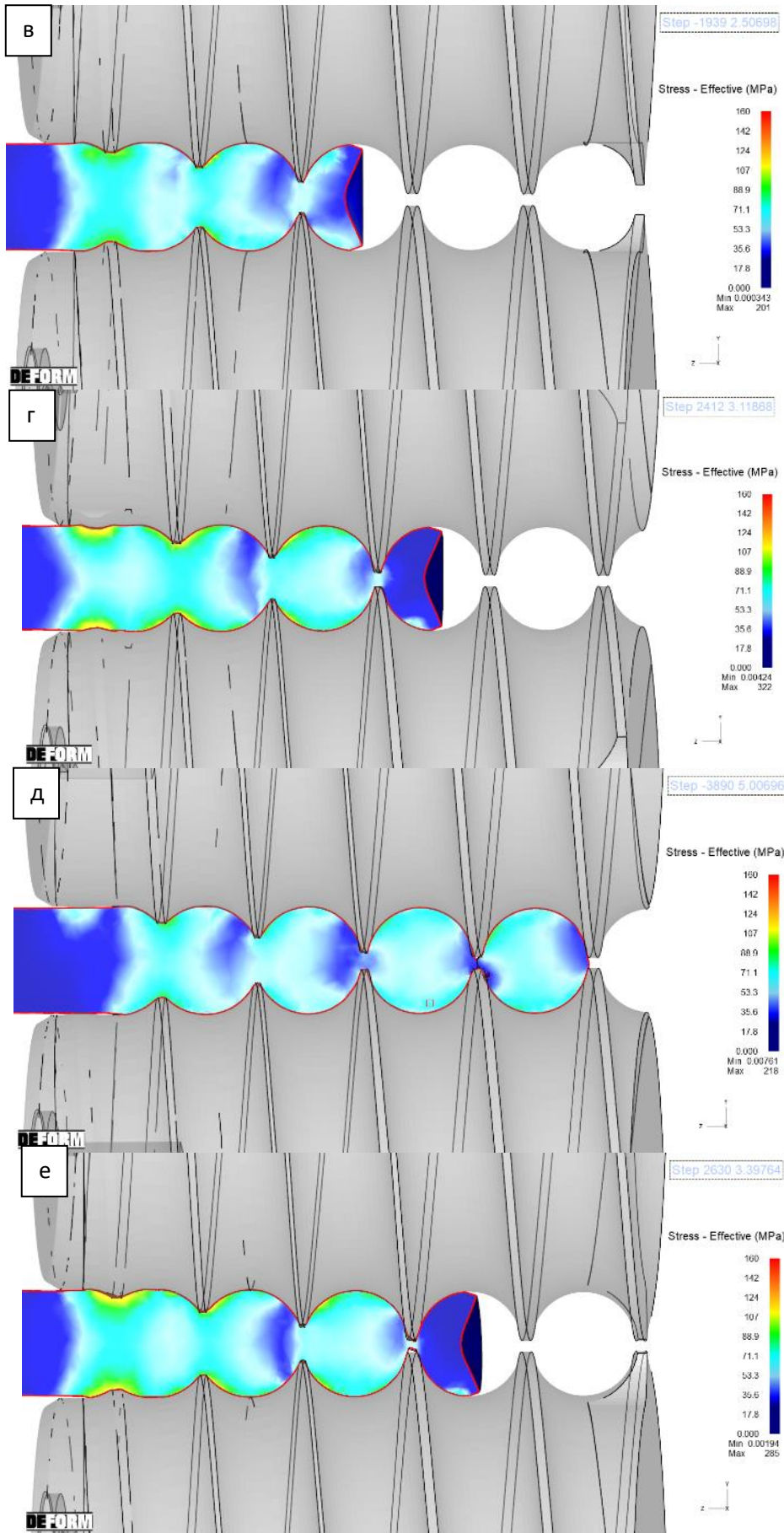


Рисунок 2.10 Результаты расчета точечных напряжений, возникающих при прокатке шаров диаметром 100 мм

На втором и последующих оборотах валков реборда повторно врезается в заготовку, при этом заготовка обкатывается валками (рисунок 2.10, б-г). Частоты вращения раската и валков синхронизируются, поэтому напряжения, возникающие в зоне контакта реборды с раскатом, снижаются и не превышают 285 МПа, а пиковое напряжение в заготовке составляет 322 МПа, что более чем в 1,5 раза ниже, чем напряжение при первоначальной врезке реборды.

Картина напряжений при отделении передней «половинки» заготовки представлена на рисунке 2.10, д,е. В зоне отделения перемычки не наблюдаются высокие значения напряжений (напряжения порядка 168-218 МПа), отделение происходит за счет утонения перемычки и разницы диаметров контактирующих реборд прокатного инструмента [63-65].

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:

- 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 значения интенсивности напряжений в области контакта;
- 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 шаропрокатного стана может быть усовершенствована.

2.2 Совершенствование калибровки валков для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм

В настоящий момент при прокатке шаров условным диаметром 100 мм на шаропрокатном стане АО «ЕВРАЗ НТМК» используются двухзаходные валки.

В процессе прокатки шаров по двухзаходной калибровке, в соответствии с проектными настроечными параметрами, вертикальный угол наклона валков составляет $4,5-5^\circ$, и он равен среднему углу наклона реборд. При работе на таких углах тангенциальные напряжения имеют повышенные значения.

В подразделе 1.2.4 указаны проблемы технологического процесса прокатки. Производство шаров диаметром 100 мм на валках с двухзаходной калибровкой с повышенным износом поверхности реборд (рисунок 1.17) приводит к появлению на поверхности шаров характерных дефектов «шляпка» (рисунок 1.18), размеры которых могут превышать предельно-допустимые.

В разделе 2.1 выполнен анализ процесса прокатки шаров диаметром 100 мм с применением действующей двухзаходной калибровки валков. В результате анализа установлено, что при двухзаходной прокатке мелющих шаров диаметром 100 мм из-за большого угла наклона прокатных валков происходит повышенный износ реборд не только в нормальном (перпендикулярно оси валка – по вершинам реборд), но и в тангенциальном (вдоль оси валка - по боковой стороне реборд) направлениях (Рисунок 1.17). Данный фактор значительно увеличивает расход прокатных валков [66-68].

При переточках отношение шага к диаметру валка в еще большей степени увеличивается, что приводит к еще большим тангенциальным нагрузкам, которые уменьшают эффективность полезных сил при прокатке. Все это приводит к увеличению нагрузки на электродвигатель главного привода стана. В связи с этим при прокатке шара диаметром 100 мм с нормативной часовой производительностью нагрузки на прокатный двигатель составляют в среднем 85-90% от номинальных нагрузок (рисунок 2.11).

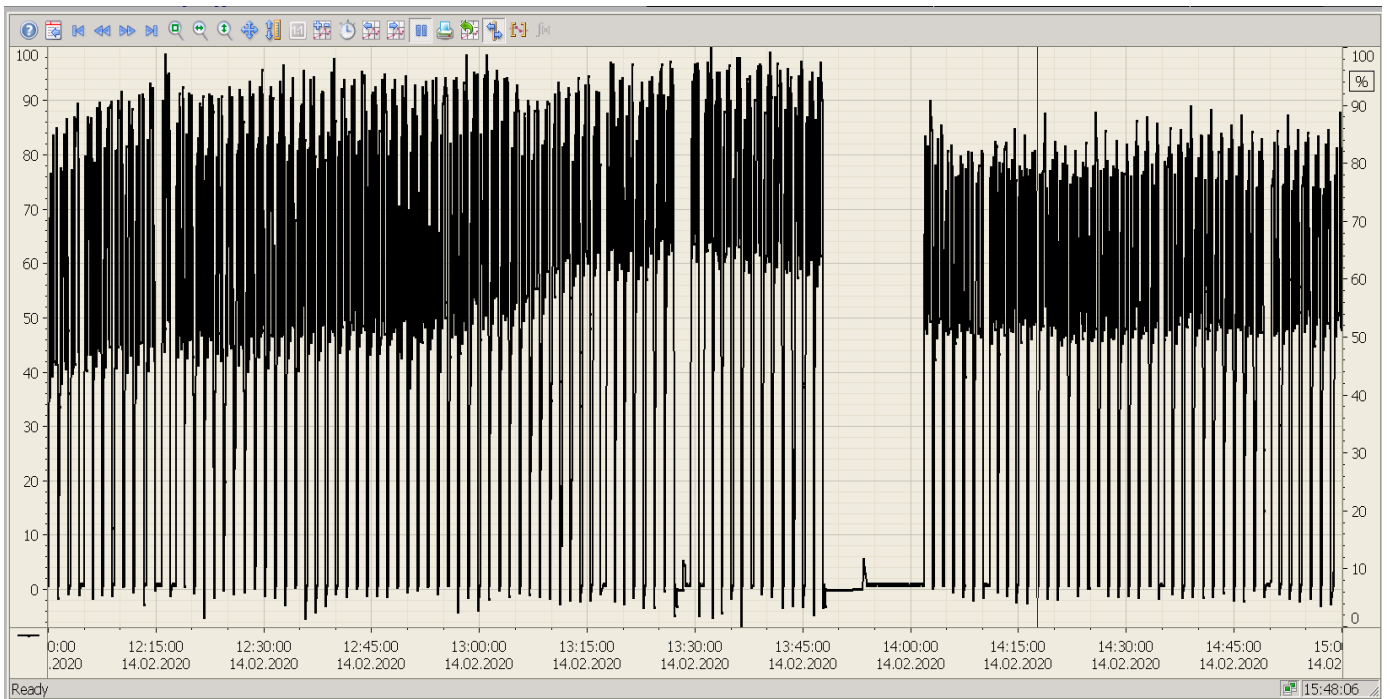


Рисунок 2.11 - Диаграмма использования мощности прокатного двигателя при прокатке шара 100 мм по действующей калибровке

Кроме этого при повышенных тангенциальных нагрузках максимальные контактные давления смещаются от вершины реборды на боковую поверхность, что приводит к интенсивному износу валков в этой части калибра.

Расчет калибровки прокатки валков

Для совершенствования процесса прокатки была разработана новая калибровка. Для расчета калибровки валков использовался метод ВНИИМЕТМАШ приведённый в разделе 1.5.

Полученные расчетным путем, шаги нарезки уточняются в соответствии с паспортными данными токарно-винторезного стана, на котором будет нарезаться калибр, после чего строится график нарезки калибра.

На основе изложенной методики выполнены вычисления основных параметров элементов витка калибра. Исходные данные и результаты таких расчетов приведены в таблицах 2.1-2.2.

Таблица 2.1 – Исходные данные для вычисления основных параметров элементов витка калибра

Параметр	Значение	Ед. измерения
Диаметр заготовки шара	100±1,5	мм
Диаметр валка	700	мм
Температура прокатки	1000	°С
Радиус профиля калибра с учетом температурного расширения заготовки	52,26	мм
Диаметр прокатываемого шара	104±4,0	мм
Протяженность калибра	1800	град.
Протяженность отделочного участка калибра, °	1080	град.
Протяженность формирующего участка калибра, °	720	град.
Диаметр передней перемычки	10	мм
Диаметр задней перемычки	11	мм
Высота реборды в начале калибра	4	мм
Ширина реборды на первом витке калибра	11	мм
Ширина реборды на отделочном участке калибра	12	мм
Средний шаг нарезки t_0	113,5	мм
Общий объем металла ($V_{\text{шара}} + \text{перемычки}$)	130833,3	мм ³

Таблица 2.2 – Результаты вычисления основных параметров элементов витка калибра

α_0	h_{α} , мм	d_{α} , мм	C_{α} , мм	$C_{\alpha-360}$, мм	V_{ca} , мм ³	$V_{C_{\alpha-360}}$, мм ³	V_{α} , мм ³	$\pi R^2 (t_0 - 2C_{\alpha-360})$, мм ³	$\pi(R^2 - (d_{\alpha-360}^2)/8)$, мм ³	a_{α} , мм
1800	4,00	92,00	20,05	27,04	163520,18	211218,25	39865,44	646744,48	5253,56	22
1710	7,54	85,17	27,04	32,18	211218,25	241089,20	68326,66	526820,94	5728,73	16
1620	11,08	78,33	32,18	36,26	241089,20	261050,59	57802,17	438721,73	6167,25	15,4
1530	14,63	71,50	36,26	39,61	261050,59	274627,04	48157,40	368771,47	6569,12	12,5
1440	18,17	64,67	39,61	42,40	274627,04	283824,59	39392,35	311340,38	6934,33	12,1
1350	21,71	57,83	42,40	44,74	283824,59	289939,44	31507,02	263456,30	7262,89	11,8
1260	25,25	51,00	44,74	46,69	289939,44	293873,62	24501,42	223329,84	7554,79	11,2
1170	28,79	44,17	46,69	48,31	293873,62	296283,12	18375,54	189794,09	7810,03	10,5
1080	32,33	37,33	48,31	49,62	296283,12	297656,40	13129,39	162048,46	8028,62	9,9
990	35,88	30,50	49,62	50,66	297656,40	298359,39	8762,96	139526,49	8210,55	9,3
900	39,42	23,67	50,66	51,43	298359,39	298662,96	5276,25	121821,89	8355,83	8,7
810	42,96	16,83	51,43	51,94	298662,96	298760,01	2669,26	108644,50	8464,46	8,0
720	46,50	10,00	51,94	51,94	298760,01	298760,01	942,00	99793,42	8536,43	8,5
630	46,50	-	51,94		298760,01	-	-	-	-	8,5

На основе метода ВНИИМЕТМАШ произведен расчет ширины реборды (см. таблицу 2.2). Для расчёта использованы формулы (1.3-1.16). При расчете калибровки валков (с целью уменьшения износа реборд) увеличена ширина реборды в начале формирующего участка при захвате заготовки с учетом соблюдения условий постоянства объема металла в калибре.

С целью расчета заполнения калибра и уточнения его ширины произведен расчет коэффициента избытка металла в соответствии с формулой (2.16). Результаты расчёта приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчета заполнения калибра и коэффициента избытка металла

α_o	$V_o, \text{мм}^3$	$V_{ca}, \text{мм}^3$	S'_α	$V_{s'a}$	V_{a+360}	V_{ca+360}	K
1800	73086,6	211218,2	51,4	110189,2	39865,4	211218,2	1,03
1710	45551,1	241089,2	43,4	93071,8	68326,7	241089,2	1,10
1620	37089,7	261050,6	33,7	72333,4	57802,2	261050,6	1,10
1530	25082,0	274627,0	28,5	61063,2	48157,4	274627,0	1,09
1440	19860,3	283824,6	22,2	47563,0	39392,3	283824,6	1,08
1350	15491,0	289939,4	16,9	36235,1	31507,0	289939,4	1,06
1260	11407,1	293873,6	12,8	27546,3	24501,4	293873,6	1,04
1170	8075,5	296283,1	9,6	20505,2	18375,5	296283,1	1,02
1080	5427,3	297656,4	7,0	14911,6	13129,4	297656,4	1,00
990	3393,7	298359,4	5,0	10624,0	8763,0	298359,4	0,99
900	1905,7	298663,0	3,5	7540,6	5276,2	298663,0	0,98
810	956,5	298760,0	2,0	4392,7	2669,3	298760,0	0,97
720	333,0	298760,0	1,1	2428,9	942,0	298760,0	0,96
630	-	-	1,1	2394,3	-	-	-

Заполнение калибра металлом отвечает условиям предельно-допустимого заполнения калибра $k_{\max} \leq 1,2$. С целью уточнения ширины реборды произведен расчет шага подрезки по формуле 1.21. Результаты расчёта приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. - Результаты расчета шага подрезки

α_o	$a_\alpha, \text{мм}$	C_α	S_α	Шаг подрезки $t_{\text{подр}}$
630	-	-	0	-
720	8,5	51,94	1,13	117,2
810	8,6	51,43	2,05	119,4
900	8,7	50,66	3,52	119,3
990	9,3	49,62	4,96	121,5
1080	9,9	48,31	6,96	123,9
1170	10,5	46,69	9,56	126,6
1260	11,2	44,74	12,85	129,7
1350	11,8	42,40	16,90	134,6
1440	12,1	39,61	22,19	138,7
1530	12,5	36,26	28,48	134,5
1620	15,4	32,18	33,74	152,2
1710	16,0	27,04	43,41	145,4
1800	22,0	20,05	51,40	113,5

По результатам расчета элементов построен график нарезки калибров (рисунок 2.13).

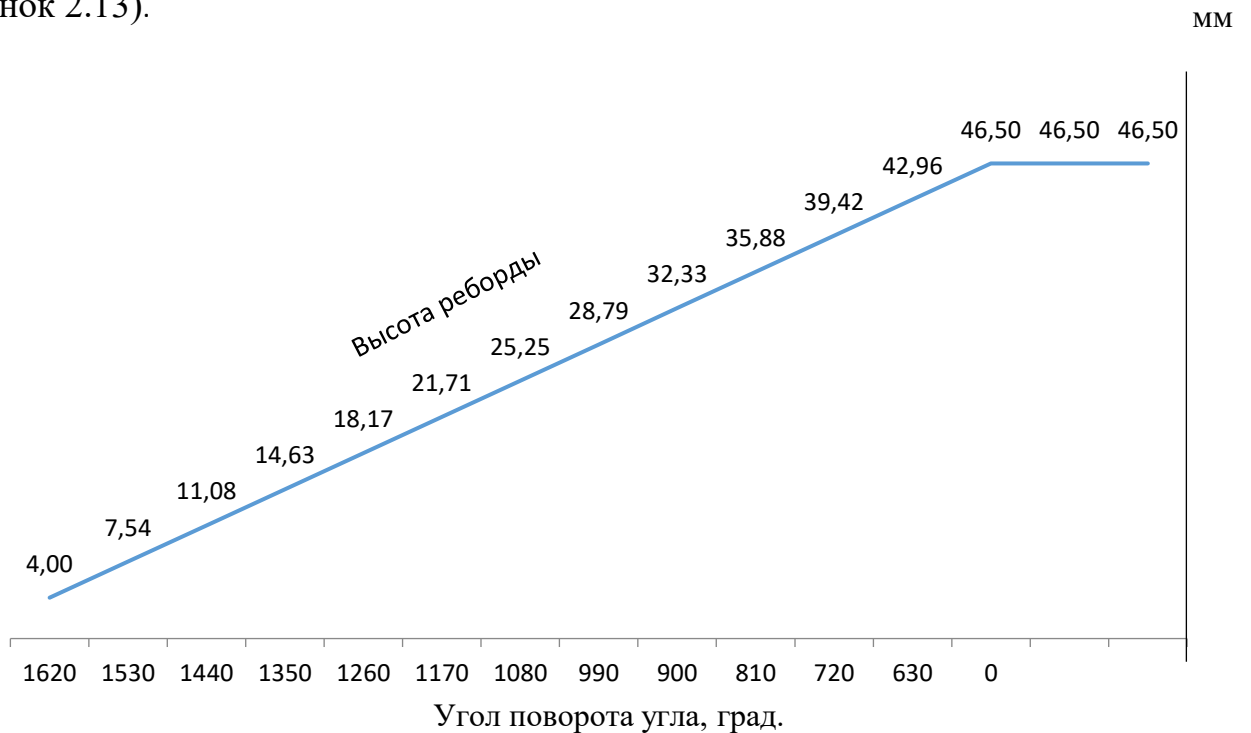


Рисунок 2.13 - График нарезки калибров

При построении 2х заходной калибровки, диаметр и длину перемычки на отдельном участке калибра, высоту и ширину реборды на участке захвата определяли так же, как и при расчете однозаходного калибра по опытным данным.

На основании расчетов калибров и применении функции кривой шага калибра разработана новая калибровка двухзаходных валков с непрерывно изменяющимся шагом для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм [69-71].

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

2.3 Компьютерное моделирование новой калибровки двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных марок стали

Постановка задачи по моделированию процесса прокатки

Моделировали прокатку мелющих шаров из горячекатаных круглых заготовок диаметром 100 мм из легированной стали марки 65С2Х по новой двухзаходной калибровке (рисунок 2.14).

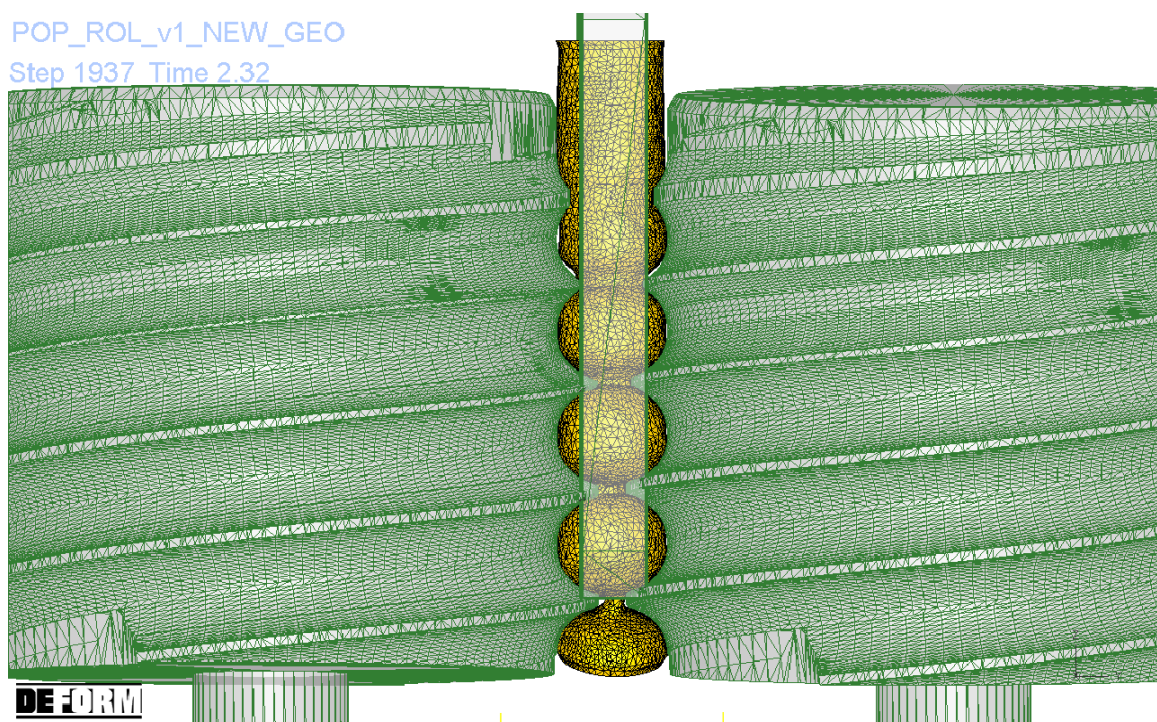


Рисунок 2.14 – Схема прокатки мелющих шаров

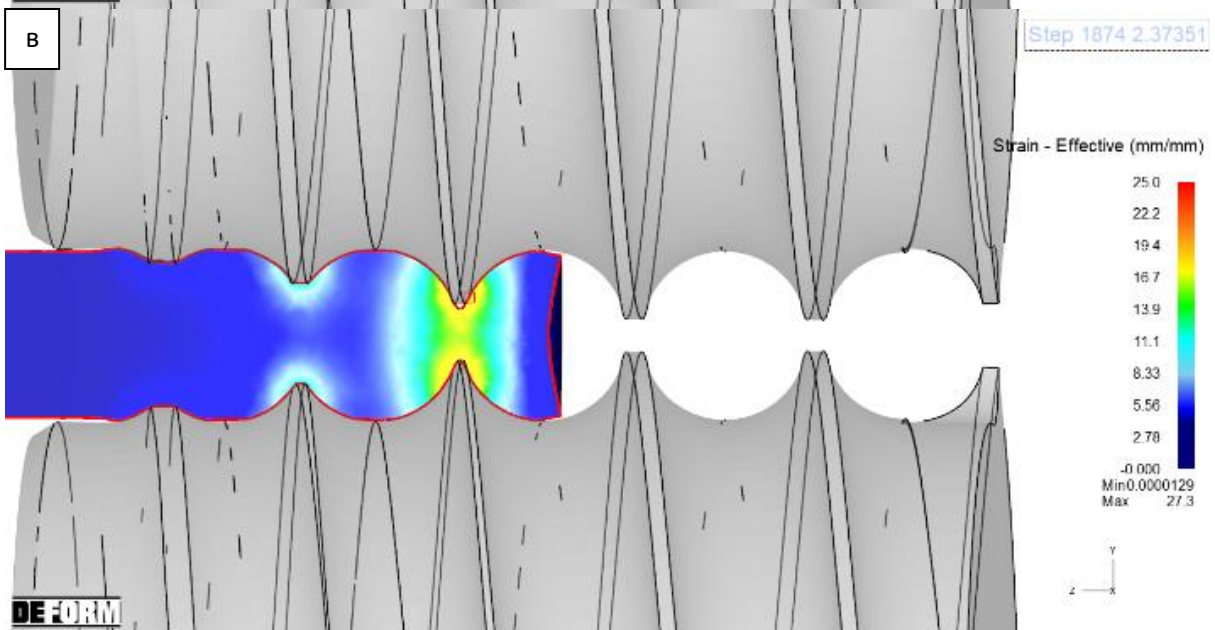
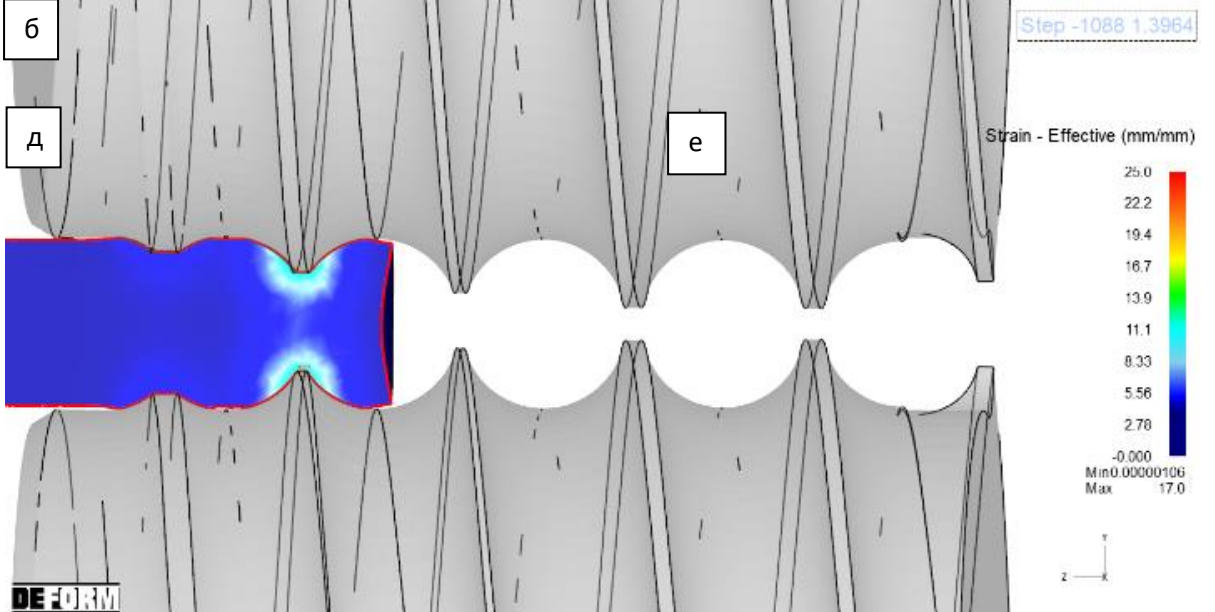
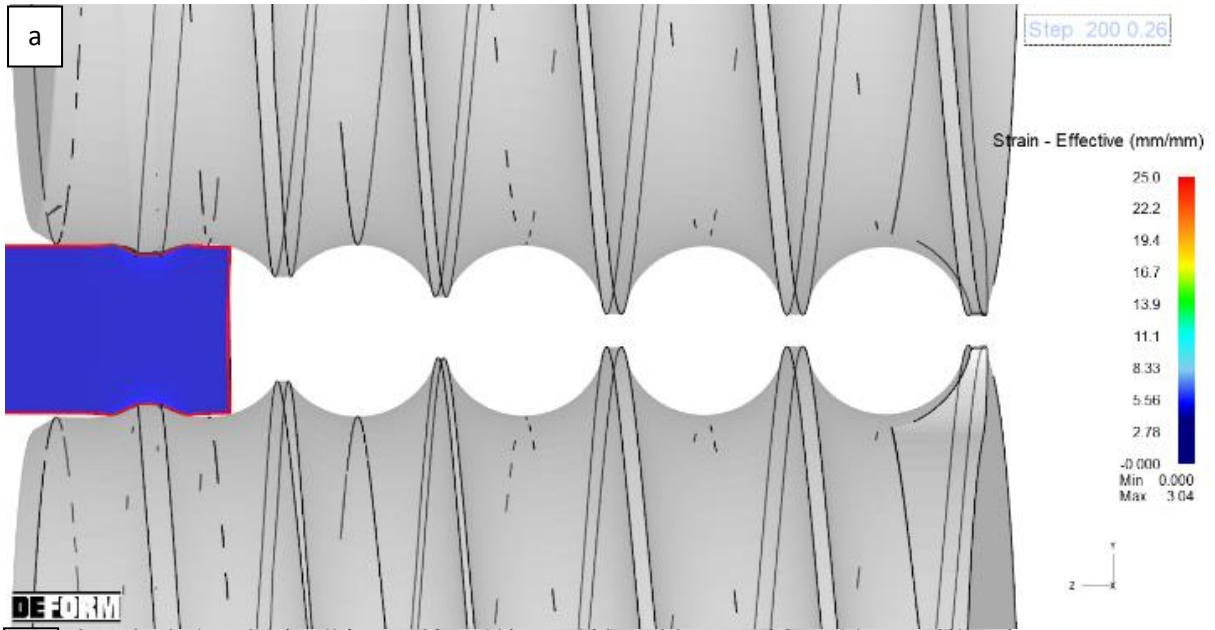
В разделе 2.1 описана методика постановки задачи и разработанная модель поперечно-винтовой прокатки шаров в программном комплексе Deform-3D, примененная для анализа действующей в условиях нового шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» калибровки валков [72-75]. Результаты моделирования формоизменения металла по этой модели с высокой точностью совпали с формоизменением в условиях действующего производства. Таким образом, можно считать разработанную модель верифицированной. Поэтому моделирование новой калибровки осуществляли с использованием этой модели [76].

Компьютерное моделирование проводилось для различных вариантов настроечных параметров с использованием угла наклона валков β от 2,5 до 4,5 °.

По результатам расчетов различных итераций установили, что наилучшие результаты прокатки шаров показали при вертикальном наклоне валков $\beta = 3,5^\circ$, межосевое расстояние между валками на входе 698 мм, межосевое расстояние между валками на выходе 695 мм. Частота вращения валков при моделировании составила 45 об/мин, температура заготовки 1030 °С [77-80].

На рисунке 2.15 представлены результаты расчета моделирования деформационных показателей при использовании новой калибровки. В соответствии с рисунком 2,15 а-б со стороны входного конца формируется так называемая половинка с характерной осевой утяжкой, на данном участке значения интенсивности деформации составляют от 3,4 до 17,1 мм/мм. Увеличение значения деформаций до 27 мм/мм возникают под действием валков в зоне глубокой врезки реборды (рисунок 2.15, в-г). Максимальные значения интенсивности деформаций, возникающие в зоне отделения перемычки, достигают значений 38,1 мм/мм (рисунок 2.15, д-е). В остальных зонах деформации распределены равномерно, при этом в перемычке и по длине калибра они соизмеримы по значениям. На рис. 2.15, б-д видно, что на поверхности заготовки деформация металла незначительна. Основная деформация происходит по участкам указанными голубым цветом, в средних значениях 15–20 мм/мм. В перемычке металл первоначально деформируется одновременно со сферической поверхностью заготовки в примерно равных значениях, а затем значение его деформации увеличивается до максимума перед ее отделением.

После отделения «половинки» снижение интенсивности деформации по сравнению со старой калибровкой составляет 3,8 мм/мм (рисунок 2.15), и это объясняет дальнейшее отсутствие разряжений и растягивающих напряжений. Зачастую при применении калибровок шаропрокатных валков с интенсивной развалкой (где ширина реборды значительно уменьшается к зоне отделения перемычки) либо при некорректной настройке стана после отделения «половинки» в заготовке продолжают возникать деформации растяжения, что приводит к образованию пустот внутри шаров, которые являются внутренним дефектом [81-91].



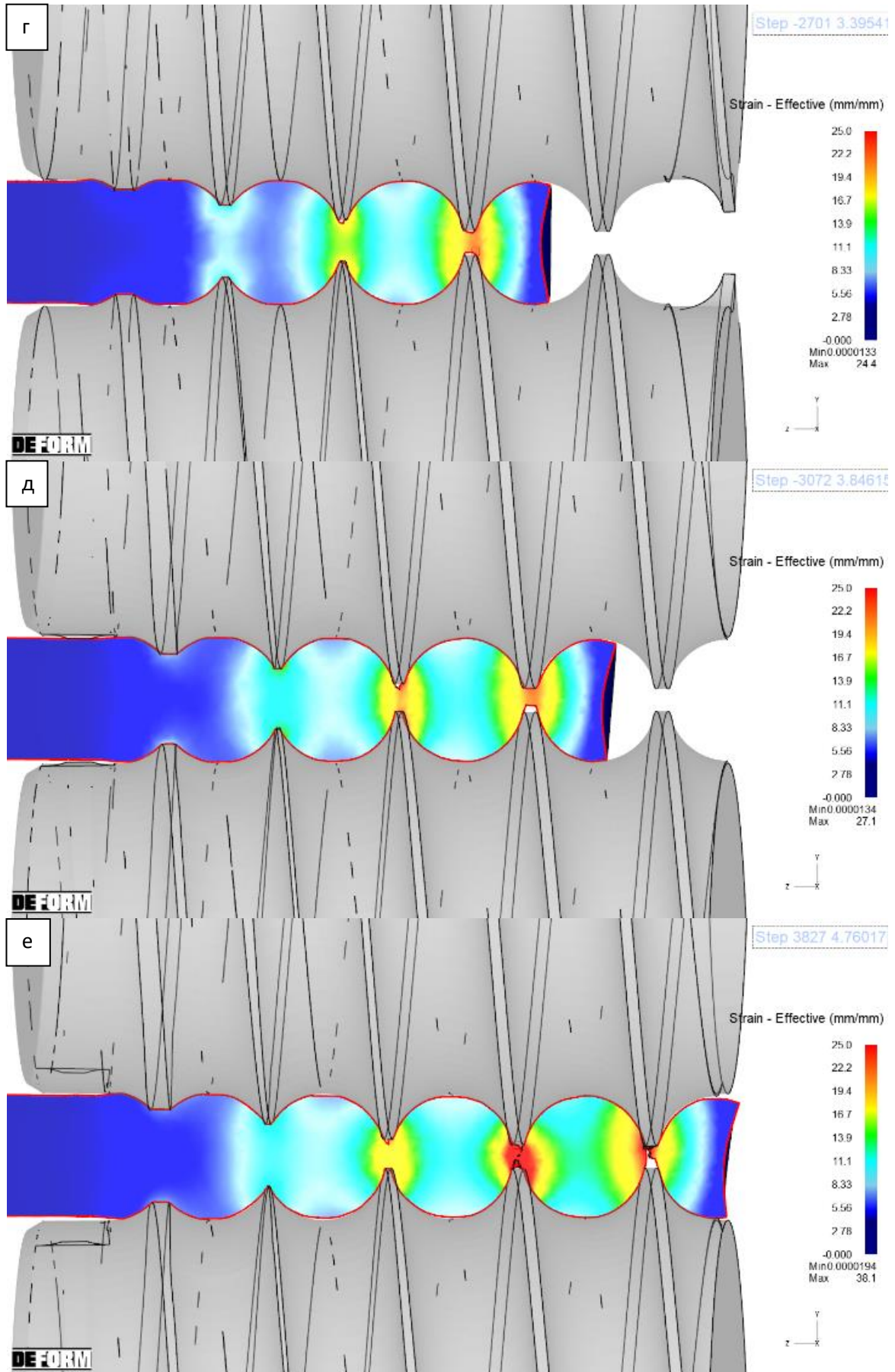


Рисунок 2.15 - Интенсивность деформаций, возникающих при прокатке шаров диаметром 100 мм по новой калибровке и настройке стана

Сравнение значений интенсивности деформации по ходу движения раската, для действующей и разработанной калибровок валков, представлены на рисунке 2.16.

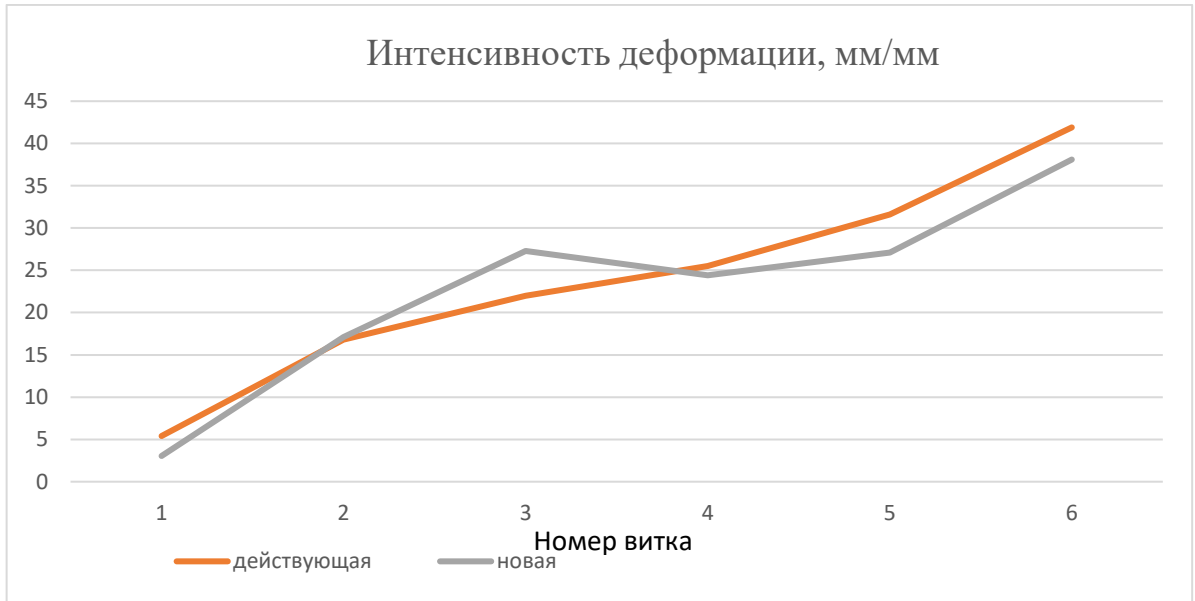
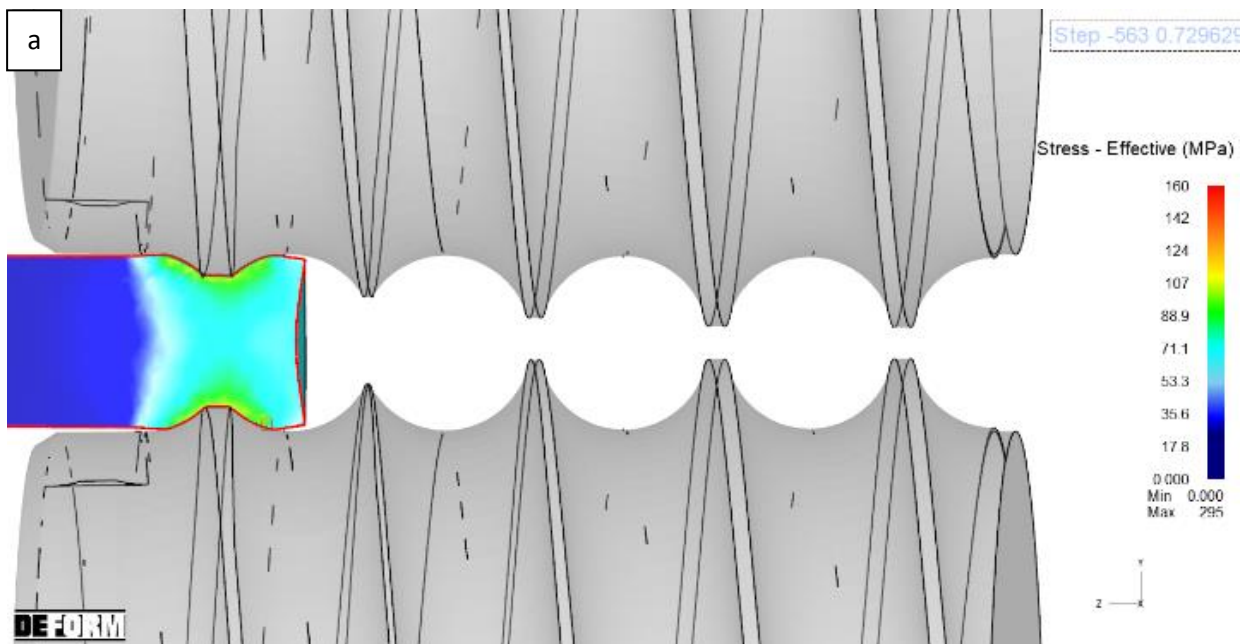
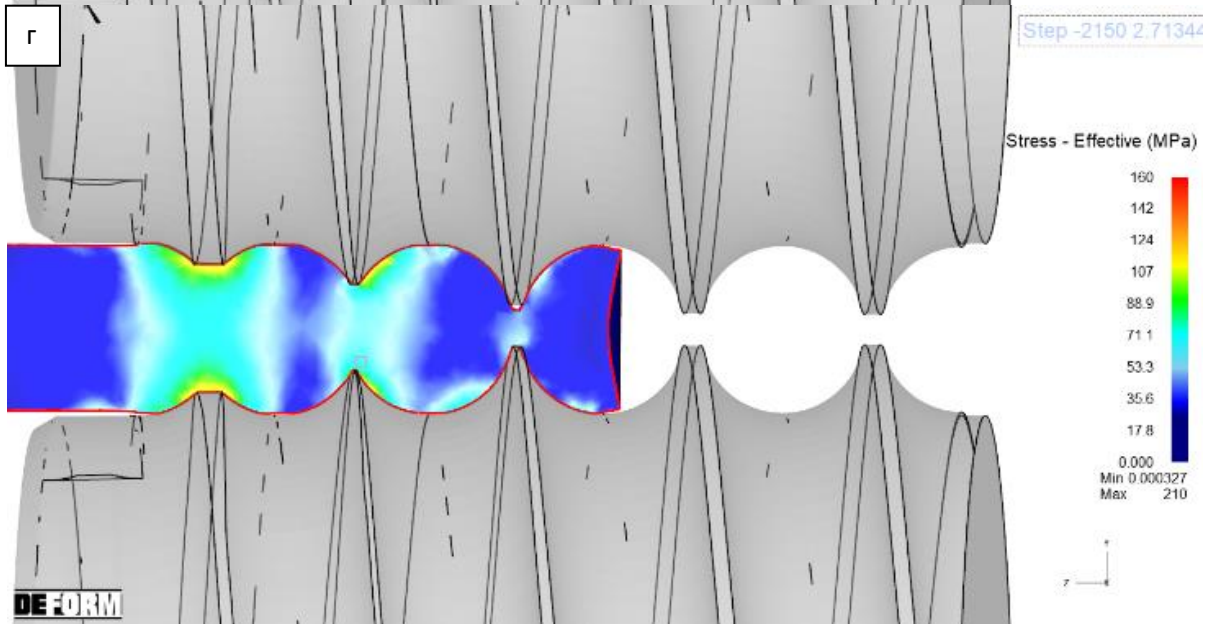
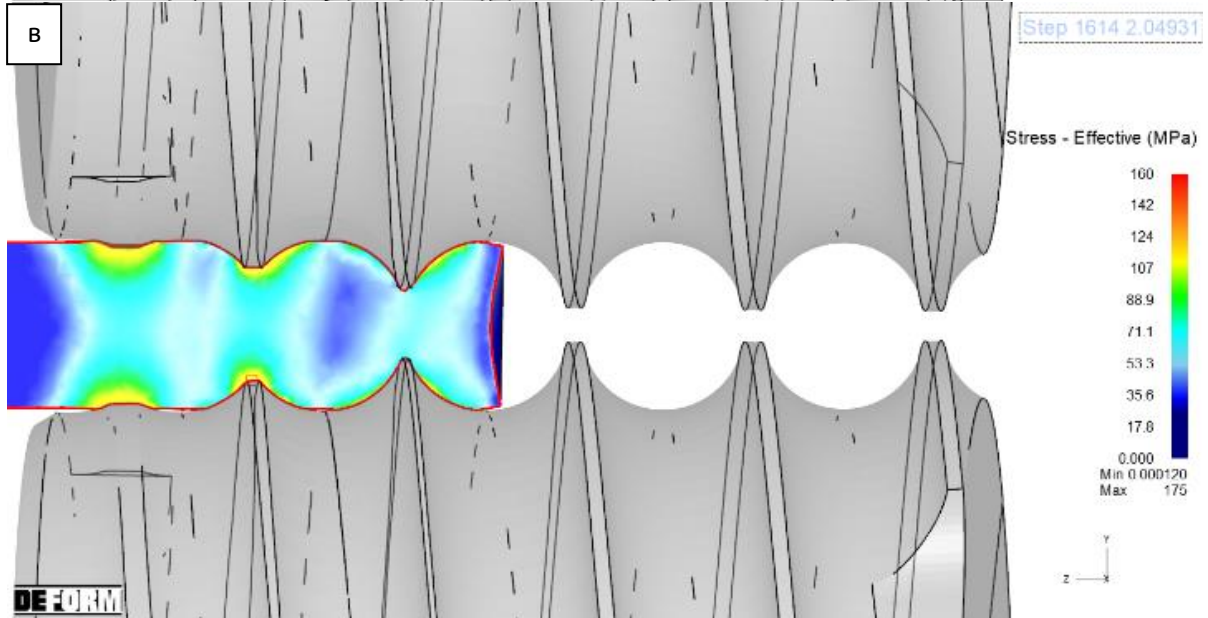
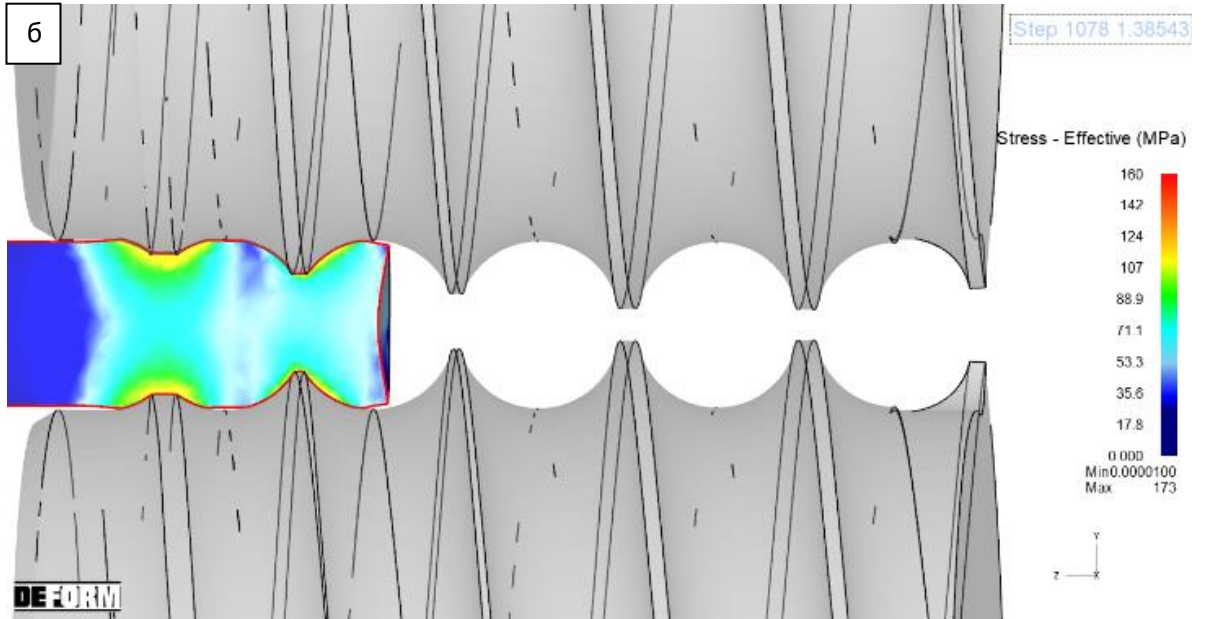


Рисунок 2.16 - График изменения интенсивности деформации при действующей и новой калибровке

На рисунке 2.17 представлены результаты моделирования напряженного состояния при прокатке по новой калибровке. По разработанной калибровке валков сохраняется условие постоянства объема на протяжении всего процесса прокатки.





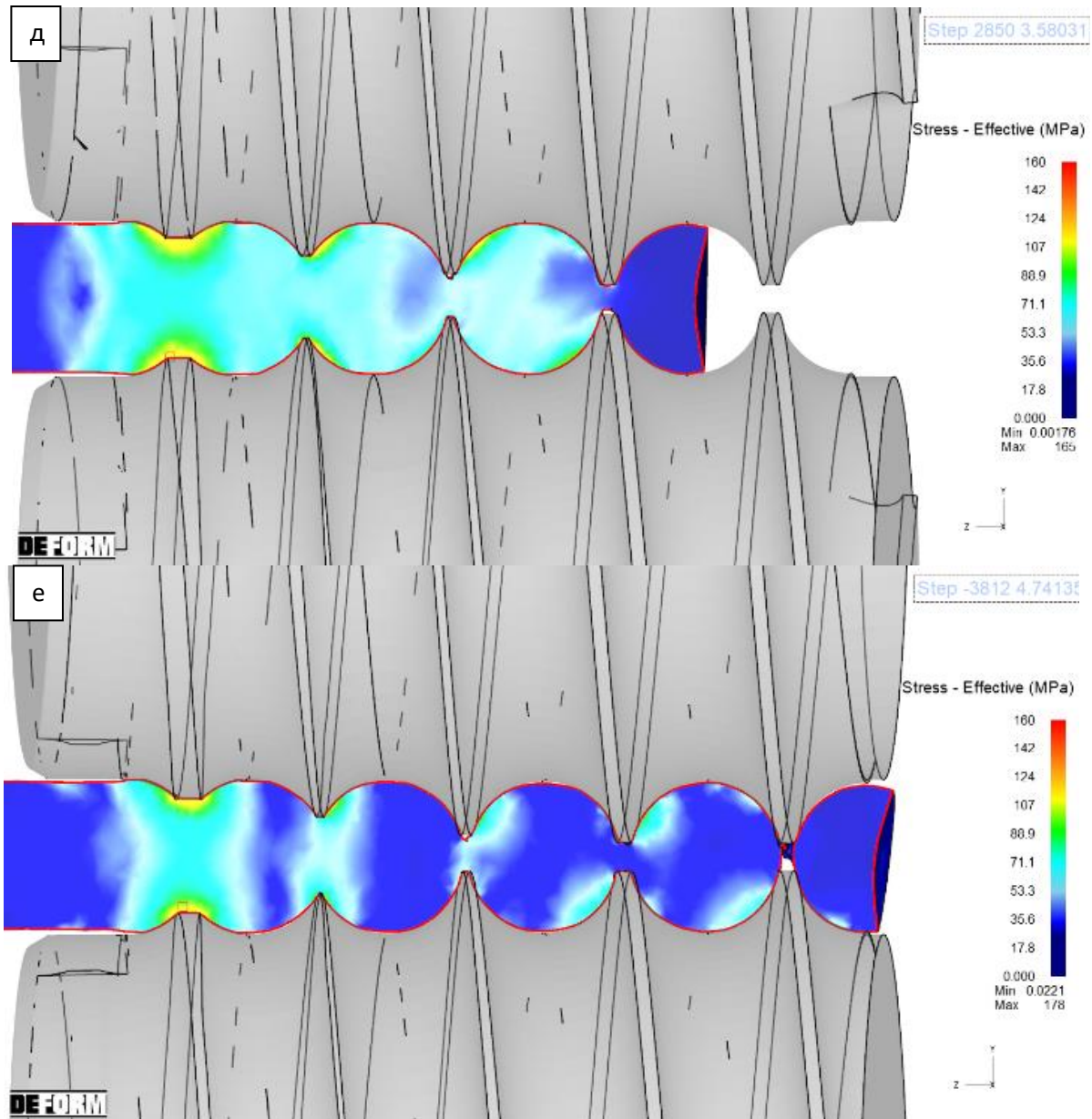


Рисунок 2.17 - Интенсивность напряжений при прокатке шаров диаметром 100 мм по новой калибровке и настройке стана

Согласно рисунка 2.17, г, уже после 3-го оборота вала получаемая фигура приближена к форме шара, и при дальнейшей прокатке ее обжатие происходит со всех сторон равномерно. Напряжения составляют 160-173 МПа, при пиковых значениях 295 МПа. В данном случае равномерность напряжений по длине заготовки приводит не только к повышенной точности геометрических характеристик шара, но и к равномерности износа валков. В отличие от большинства используемых калибровок, где максимальные напряжения и износ сосредоточены на ребрах вала, в данной калибровке они сконцентрированы

только в зоне врезки. На других участках наблюдается равномерная деформация металла со всех сторон, а напряжения составляют 165-178 МПа.

Сравнение значений интенсивности напряжений по ходу движения раската, для действующей и разработанной калибровок валков, представлено на рисунке 2.18.

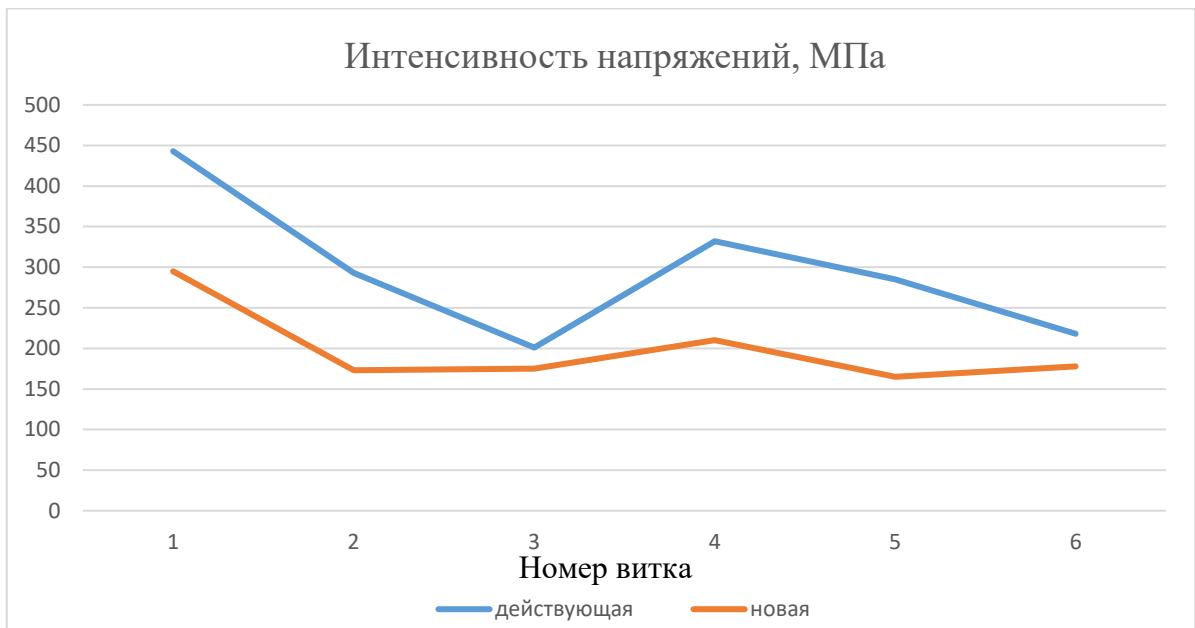


Рисунок 2.18 - График изменения интенсивности напряжений при действующей и новой калибровке

Снижение напряжений по сравнению с действующей калибровкой (рисунок 2.18) подтверждает эффективность калибровки с непрерывно-изменяющимся шагом ввиду наличия эффекта растяжения в осевой зоне при отделении «половинки» в новой калибровке (рисунок 2.17, е) [92-94].

Сравнение результатов моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки шаров в программном комплексе Deform доказывает эффективность использования валков с новой калибровкой. Поэтому по разработанной модели были изготовлены рабочие валки шаропркатного стана и осуществлена опытная прокатка шаров. Результаты проведенной опытной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм подтвердили выводы, сделанные по результатам моделирования процесса прокатки.

Применение новой калибровки и корректировка настроечных параметров позволило уменьшить износ реборд и исключить образование дефекта наката металла в осевой зоне шара, кроме того удалось снизить нагрузку на прокатный двигатель.

При сравнении нагрузочных диаграмм видно разница в моментах прокатки, связанная с конструктивными изменениями калибровки.

Момент прокатки при расчете действующей калибровки с дискретно-изменяющимся шагом калибра прокатных валков представлен на рисунке 2.19.

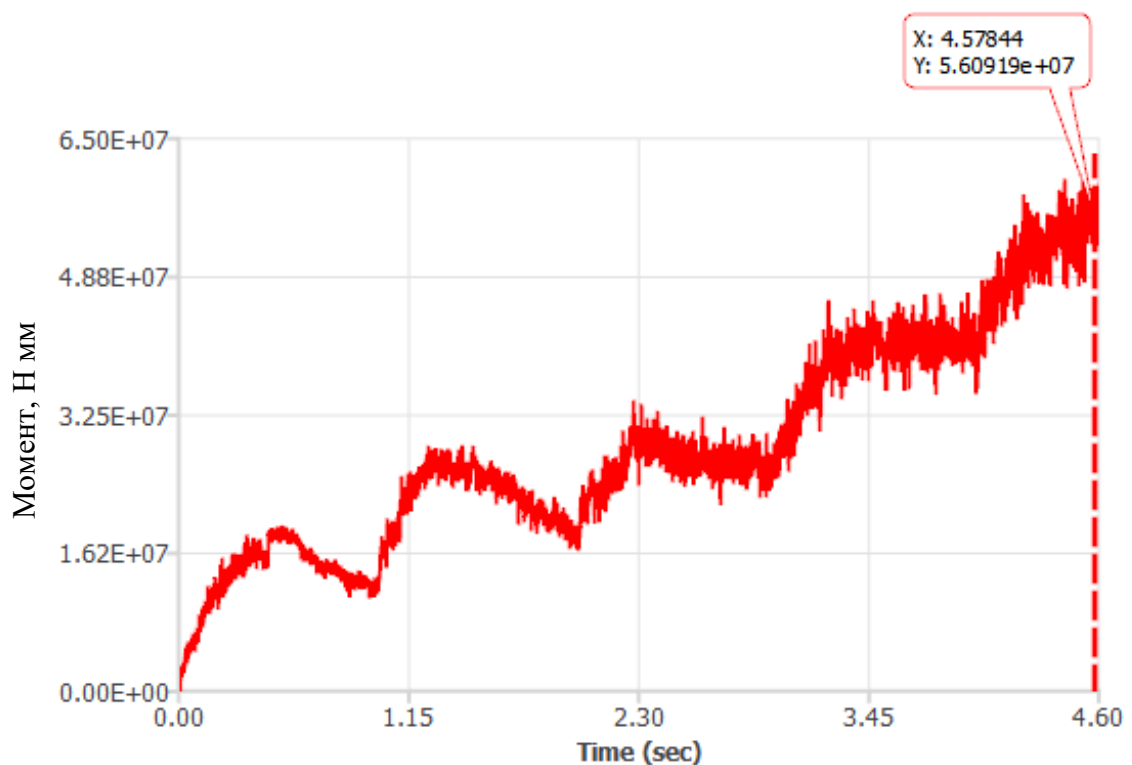


Рисунок 2.19 - Момент прокатки шаров диаметром 100 мм при расчете действующей калибровки

Момент при расчете новой калибровки с непрерывно-изменяющимся шагом расположения и шириной реборд прокатных валков представлен на рисунке 2.20.

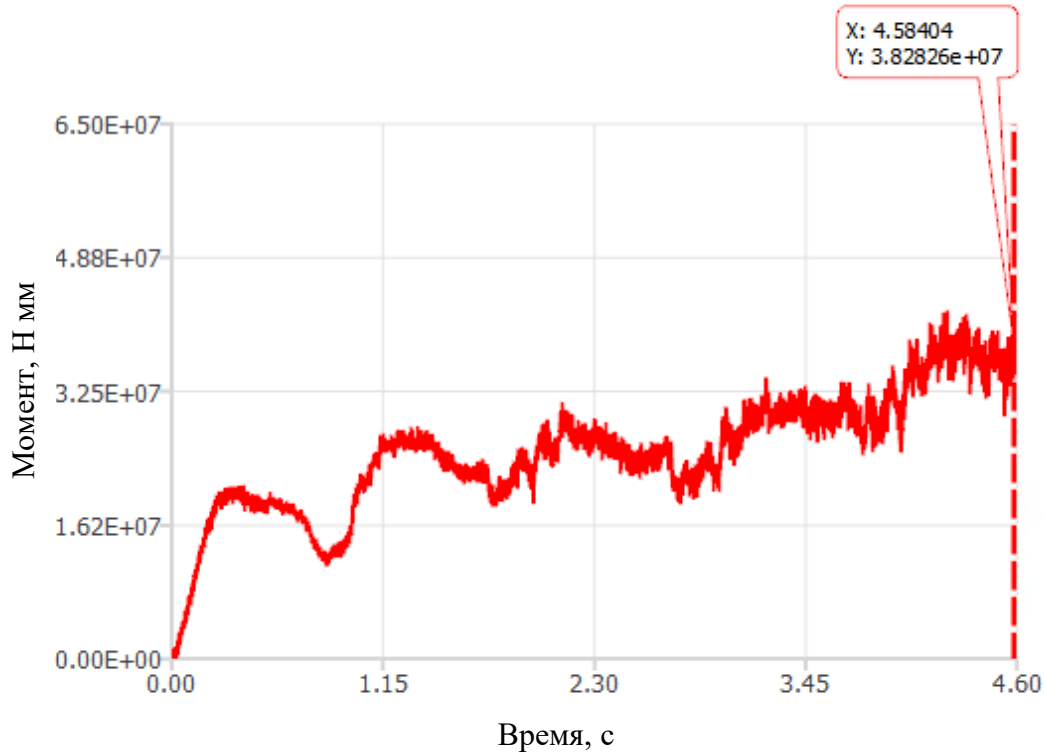


Рисунок 2.20 - Момент прокатки шаров диаметром 100 мм при расчете новой калибровки

Снижение нагрузки при уменьшении перемычек и отделении половинок связан с применением новой калибровки.

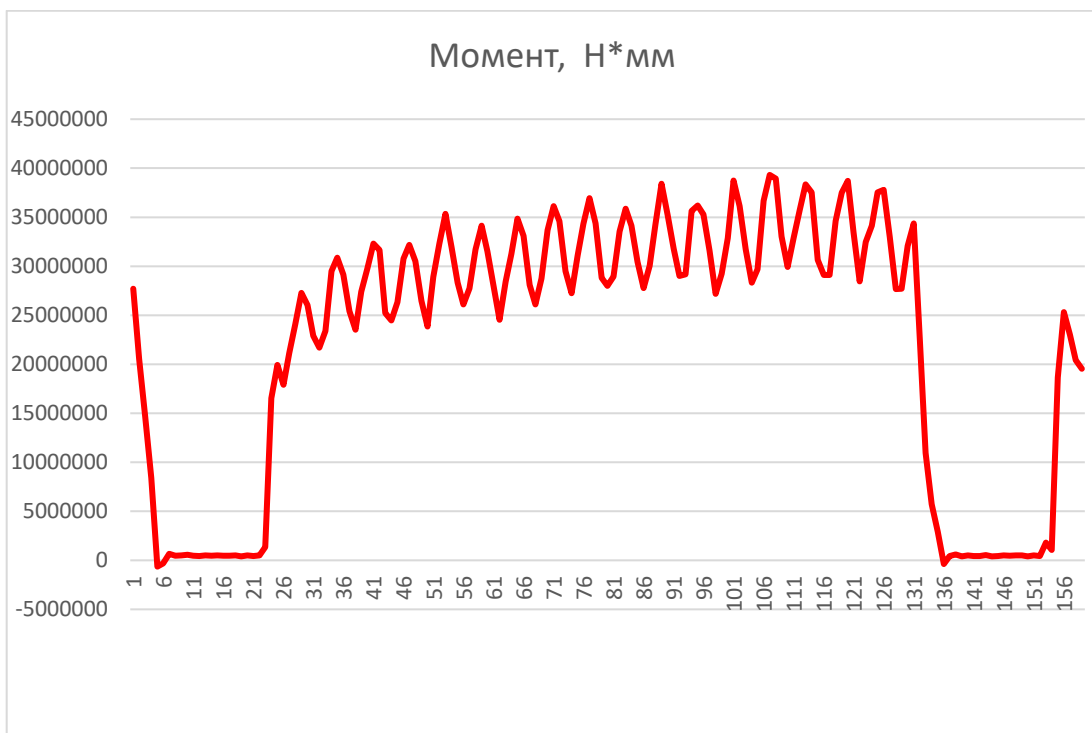


Рисунок 2.21 - Момент прокатки при прокатке по новой калибровке

Фактический момент при новой прокатке с непрерывно-изменяющимся шагом расположения и шириной реборд прокатных валков (рисунок 2.21) показывает сопоставимость результатов моделирования.

2.4 Результаты внедрения новой калибровки двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм

Результаты моделирования новой калибровки, приведенные в разделе 2.3, показали работоспособность новой калибровки, снижение напряжений и износа реборд. На основании расчетов новой калибровки построены твердотельные модели прокатных валков (см. рисунок 2.22).

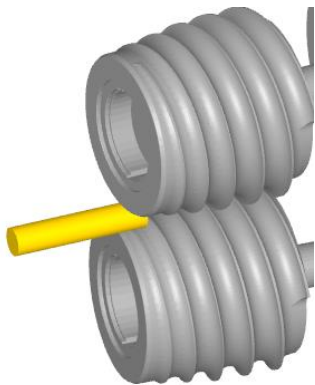


Рисунок 2.22 - Модели прокатных валков с новой калибровкой

На основании, разработанных моделей изготовлены рабочие валки шаропрокатного стана. Прокатана опытная партия шаров - 2000т.

При внедрении новой калибровки потребовалась настройка стана с отклонением от проектных параметров с целью обеспечения стабильности процесса прокатки. Настройка стана производится по параметрам, представленным в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Настроечные параметры шаропрокатного стана при прокатке опытной партии шаров диаметром 100 мм по разработанной калибровке

Номинальный диаметр шара	Диаметр холодного шара (ном.), мм	Фактические расстояния от оси валка до оси прокатки Dv (валки параллельны), мм				Расстояние между ребрами валков в пережиме, мм	Угол наклона валков, α° , град
		левый вход	левый выход	правый вход	правый выход		
Ø100	104,0+0,5	343,5	346,6	345,8	352,0	13,0	3,5

Зазор между проводками установлен 115 мм на входе, 117 мм на выходе из калибра.

При апробации новой калибровки шаров вертикальный угол наклона уменьшен до 3,5 град. Это привело к снижению тангенциальных нагрузок, что подтверждается уменьшенным износом боковых стенок калибров (рисунок 2.23).



Рисунок 2.23 - Фотография шара и состояние рабочей реборды при новой калибровке и настройках стана

Снижение вертикального угла наклона валков привело к более щадящим режимам обжатий и позволило снизить нагрузку на прокатный двигатель на 10-15 % (рисунок 2.24).

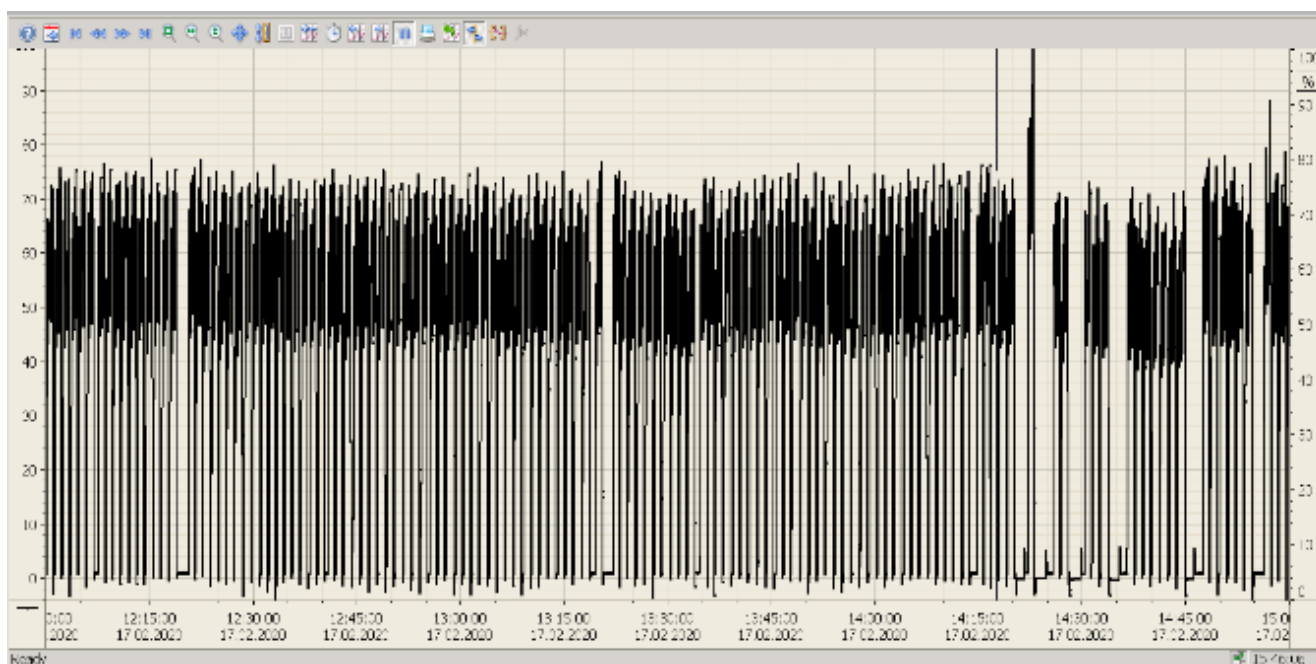


Рисунок 2.24 - График использования мощности прокатного двигателя при прокатке шара 100 мм при прокатке по новой калибровке

Результаты опытной прокатки показывают, что прокатанные мелющие шары условным диаметром 100 мм по форме и размерам соответствуют требованиям [5]. Размер шара составил 103,2-104 мм.

Качество поверхности мелющих шаров показывает отсутствие недопустимых дефектов (см. рисунок 2.23). Присутствует технологический поясok шириной до 15 мм [95-97].

Состояние поверхности рабочих калибров валков после прокатки показывает отсутствие значительного износа рабочей поверхности калибра и боковых поверхностей реборд. Примененные настроечные параметры обеспечивают получение стабильного процесса прокатки.

2.5 Выводы

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 формoизменения с размерами шаров и «половинок» фактически

полученных на стане, свидетельствует об адекватности созданной модели процесса поперечно-винтовой прокатки шаров.

2. 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.

Имеют место повышенные контактные напряжения, что вызывает существенный износ боковой поверхности реборды. 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 на поверхности шара – «шапка». Действующая калибровка валков шаропркатного стана может быть усовершенствована.

3. 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.

4. 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;
- снижение тангенциальных напряжений приводит к снижению износа боковой поверхности реборд;
- 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».

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

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

Получены следующие результаты прокатки опытной партии:

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

-вертикальный угол наклона уменьшен до 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.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ НА ШАРОПРОКАТНОМ СТАНЕ

Настроечными параметрами процесса прокатки мелющих шаров на шаропрокатном стане являются: расстояние от оси валка на входе заготовки до оси прокатки, расстояние от оси валка на выходе заготовки до оси прокатки, угол расположения валков относительно оси прокатки. Эти параметры оказывают решающее влияние на выполнение технических требований по форме и размерам мелющих шаров в соответствии с [5].

С целью определения рациональных настроечных параметров проведен анализ фактических производственных рабочих настроек шаропрокатных валков при прокатке шаров диаметром 60 мм, 80 мм, 90 мм, 110 мм, 120 мм по ГОСТ 7524-2015. Анализ проводился на новых валках, а также на валках после первой, второй, третьей и четвертой переточек винтовых шаропрокатных калибров.

Используя базу оперативных данных по настройке шаропрокатного стана, можно определить оптимальные величины для его настройки 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 [95,96].

При разработке такой модели приняты следующие допущения:

- предполагается, что геометрия шаропрокатных валков у всех комплектов одного типа и диаметра соответствует друг другу, включая геометрию проводок [97-99];

- не учитывается износ валков – рассматривается необходимость настроечных параметров только после перевалки;

- не учитываются внешние факторы (установка вводного желоба, вводной трубы и т.д.), предполагается, что вводная группа для соответствующего профиля всегда установлена единообразно относительно оси прокатки [100].

Настройка параметров прокатки осуществляется в автоматическом режиме. Интерфейс настроечной программы показан на рисунке 3.1. Регулируемыми параметрами являются:

- расстояние от оси прокатки до входа левого валка $S_{л}$;
- расстояние от оси прокатки до выхода левого валка $D_{л}$;
- расстояние от оси прокатки до входа правого валка $S_{п}$;
- расстояние от оси прокатки до выхода правого валка $D_{п}$;
- угол наклона левого валка $\beta_{л}$;
- угол наклона правого валка $\beta_{п}$;
- настроечные параметры положения проводок.

Указанные параметры вводятся вручную оператором поста управления. В зеленых ячейках указано заданное значение параметра, в белых ячейках – фактическое текущее значение показателя (см. рисунок 3.1). После ввода заданных значений параметров система управления в автоматическом режиме устанавливает прокатные валки и проводки в заданное положение.

Система управления станом позволяет сохранить настроечные параметры каждой настройки стана, применяемой в процессе производства, т.е. осуществляется постоянное накопление данных.

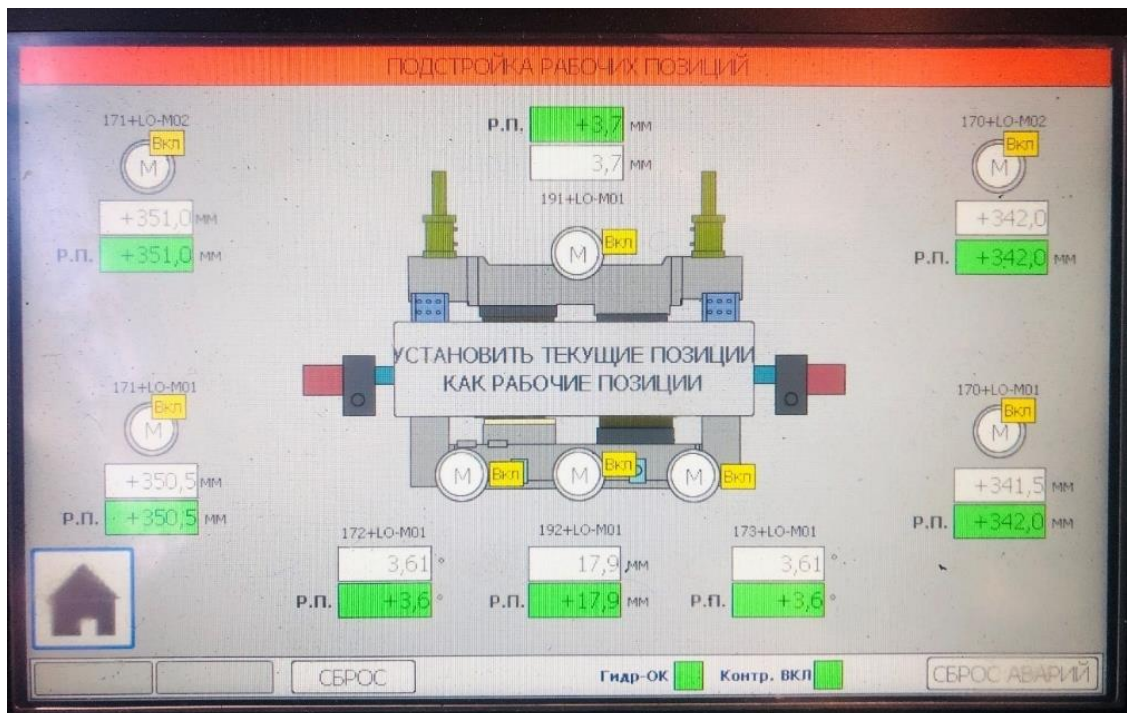


Рисунок 3.1 - Параметры настройки стана

3.1 Определение межосевого расстояния в точке скрещивания прокатных валков

При проектировании процесса прокатки шаров, основными параметрами как для расчета калибровки, так и для построения модели валка, 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 [101,102].

Точка скрещивания (рисунок 3.2 и 3.3) 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: $C_{л}$, $C_{п}$, $D_{л}$, $D_{п}$, L и A (здесь L – длина бочки валков, A – теоретическое межосевое расстояние).

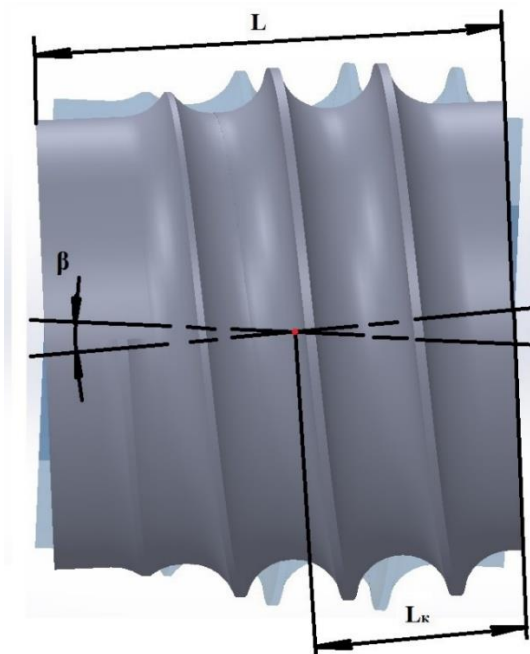


Рисунок 3.2 – Точка скрещивания валков (фронтальный вид валков)

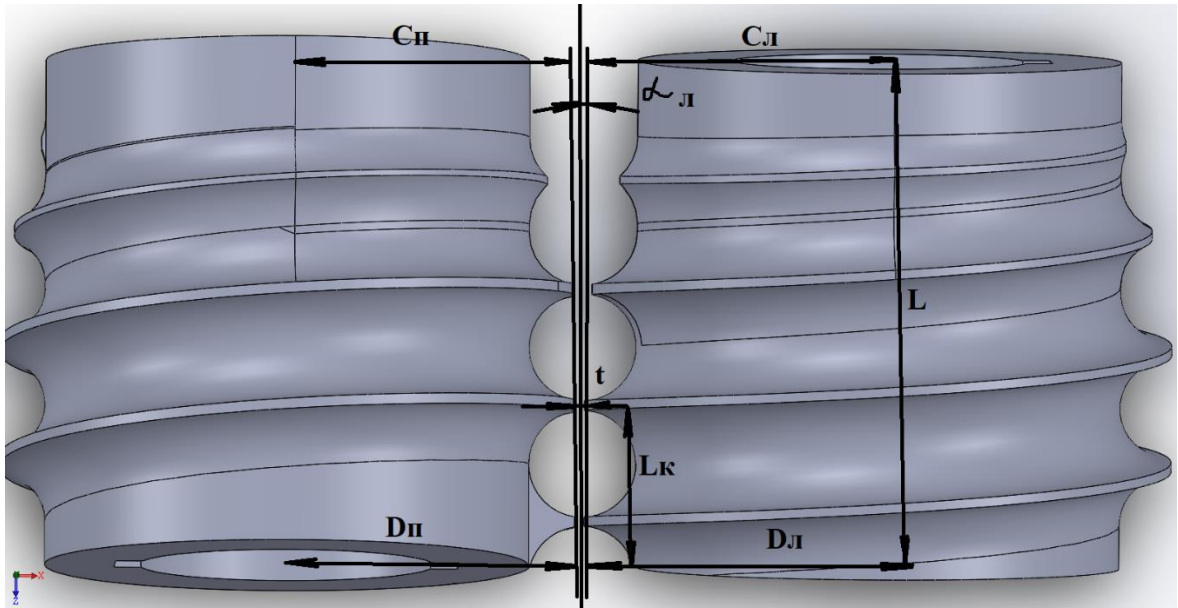


Рисунок 3.3 – Точка скрещивания валков (вид валков сверху)

Рассмотрим горизонтальную проекцию валков (см. рисунок 3.3) и определим углы $\alpha_{л}$ (угол горизонтального разведения левого валка) и $\alpha_{п}$ (угол горизонтального разведения правого валка) образующийся при настройке валков в зависимости от расстояния оси валков от оси прокатки на входе и на выходе (это не вертикальный угол наклона валков):

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{D_i - C_i}{L}\right), \quad (3.1)$$

где индекс i принимает значения л и п.

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

$$T = t_{л} + t_{п}. \quad (3.2)$$

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

$$t_i = \frac{A}{2} - C_i - (L - L_{к})\left(\frac{D_i - C_i}{L}\right), \quad (3.3)$$

где $L_{к}$ – расстояние от выхода валка до точки скрещивания.

При переточках валков будет изменяться межосевое расстояние A , поэтому, формула (3.3) примет следующий вид

$$t_i = \frac{A - K}{2} - C_i - (L - L_k) \left(\frac{D_i - C_i}{L} \right), \quad (3.4)$$

где K – величина удаленного слоя металла при переточке валков.

3.2 Определение рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана

По выражениям (3.2) и (3.3) выполнили расчет межвалкового расстояния в точке скрещивания для настроечных параметров прокатки, при которых была получена годная продукция. В качестве примера методики расчета, в таблице 3.1 приведены результаты расчетов при прокатке шаров диаметром 120 мм на новых валках. При этом для шаропрокатного стана ЕВРАЗ НТМК принято: длина бочки валков $L=600$ мм, теоретическое межосевое расстояние $A=700$ мм и расстояние от выхода валка до точки скрещивания $L_k=250$ мм.

Таблица 3.1 – Результаты расчетов межвалкового расстояния в точке скрещивания при прокатке шаров диаметром 120 мм на новых валках

№ п/п	Фактические настроечные параметры шаропрокатного стана						Расчетные значения расстояний от оси прокатки до валков		
	C_L	D_L	C_P	D_P	β_L	β_P	t_L	t_P	T
	мм	мм	мм	мм			мм	мм	мм
1	345,0	348,0	344,0	351,5	2,6	2,6	3,25	1,63	4,88
2	345,0	345,0	345,0	352,0	2,5	2,5	5,00	0,92	5,92
3	346,0	346,0	346,0	352,5	2,5	2,5	4,00	0,21	4,21
4	347,2	348,0	343,0	351,0	2,9	2,9	2,33	2,33	4,66
5	353,6	355,9	337,4	343,0	2,6	2,6	-4,94	9,33	4,39
6	347,5	348,0	344,5	351,5	2,6	2,6	2,21	1,41	3,63
7	343,0	348,2	342,0	354,2	2,5	2,5	3,97	0,88	4,85
8	346,3	348,8	344,0	349,0	2,5	2,5	2,24	3,08	5,32
9	344,7	350,5	343,5	350,0	2,5	2,5	1,92	2,71	4,63
10	345,0	349,0	342,9	350,3	2,5	2,5	2,67	2,78	5,45
11	345,5	349,0	343,8	351,4	2,5	2,5	2,46	1,77	4,23
12	348,6	350,3	341,0	351,0	3,0	3,0	0,41	3,17	3,58

На рисунке 3.4 показано изменение расчетной величины межвалкового расстояния в точке скрещивания.

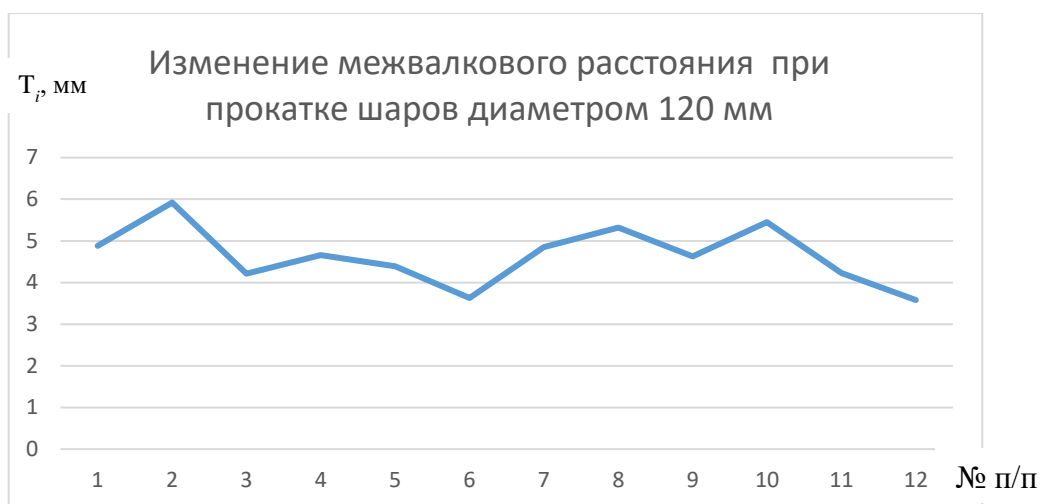


Рисунок 3.4 – Изменение расчетной величины межвалкового расстояния в точке скрещивания при прокатке шаров диаметром 120 мм на новых валках

График изменения T представляет собой пульсирующие несистематические отклонения. Для определения рациональных настроечных параметров, обеспечивающих стабильный процесс прокатки годной продукции, определили среднее геометрическое значение величины межвалкового расстояния в точке скрещивания $T_{\text{рац}}=4,56$ мм. Наиболее близкая совокупность настроечных параметров, обеспечивающая рациональное межвалковое расстояние в точке скрещивания (см. таблицу 3.1, строка выделена цветом) составила: $C_{\text{л}}=344,7$ мм; $D_{\text{л}}=350,5$ мм, $C_{\text{п}}= 343,5$ мм, $D_{\text{п}} = 350,0$ мм, $\beta_{\text{л}}=2,5^\circ$, $\beta_{\text{п}}=2,5^\circ$, $t_{\text{л}}= 1,92$ мм, $t_{\text{п}}=2,71$ мм, $T=4,63$ мм. Следовательно, указанные настроечные параметры следует считать рациональными при прокатке шаров диаметром 120 мм на новых валках.

Аналогично были выполнены расчеты межвалкового расстояния в точке скрещивания для настроечных параметров стана при прокатке шаров диаметров 60, 80, 90, 100 и 120 мм на новых валках, а также на валках после первой, второй, третьей и четвертой переточек винтовых шаропркатных калибров. Результаты таких расчетов представлены в таблицах 3.2. В результате анализа всей совокупности практических применяемых параметров, определены рациональные значения, при которых получают удовлетворительные показатели формы и размеров шаров, качества поверхности, минимальный износ валков, а также исключаются недопустимые дефекты.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов настроечных параметров

Номинальный диаметр шара, мм	Расстояние оси валков от оси прокатки, мм				Угол наклона валков, град	
	Валок левый (вход)	Валок левый (выход)	Валок правый (вход)	Валок правый (выход)	Валок левый	Валок правый
На новых валках						
60	347,0	348,5	344,3	351,3	3,0	3,0
80	345,3	349,5	344,5	350,0	3,2	3,2
90	346,9	350,0	343,2	348,4	3,4	3,4
100	345,6	348,3	344,9	349,7	3,5	3,5
120	345,5	347,7	341,1	348,5	2,6	2,6
На валках после первой переточки						
60	346,8	347,3	336,1	339,4	3,0	3,0
80	340,3	343,0	338,4	345,6	3,2	3,2
90	335,6	337,9	334,2	339,8	3,1	3,1
100	337,5	338,4	330,6	337,6	3,5	3,5
120	340,5	344,0	344,0	348,5	2,5	2,5
На валках после второй переточки						
60	344,0	346,8	326,0	331,5	3,0	3,0
80	339,8	342,0	330,3	337,3	2,7	2,7
90	336,6	338,9	324,4	329,4	3,6	3,6
100	329,1	330,1	330,0	339,0	3,8	3,8
120	337,9	339,9	332,0	339,7	2,5	2,5
На валках после третьей переточки						
60	330,2	330,2	329,5	340,5	3,0	3,0
80	329,3	330,7	321,5	326,2	2,8	2,8
90	324,8	325,1	325,4	334,2	3,3	3,3
100	324,3	325,0	324,0	330,2	3,6	3,6
120	333,1	334,6	327,3	336,8	2,5	2,5
на валках после четвертой переточки						
60	330,2	330,2	329,5	340,5	3,0	3,0
120	333,1	334,6	327,3	336,8	2,5	2,5

3.3. Разработка математической модели настроечных параметров

Настроечные параметры при производстве мелющих шаров на новых валках, а также на валках после первой, второй, третьей и четвертой переточек винтовых шаропрокатных калибров представлены в таблице 3.2.

На основании рациональных значений настроечных параметров, при которых получаются удовлетворительные показатели формы и размеров шаров построены графики зависимости расстояния валков до оси прокатки от диаметра шара (см. рисунки 3.5-3.9).

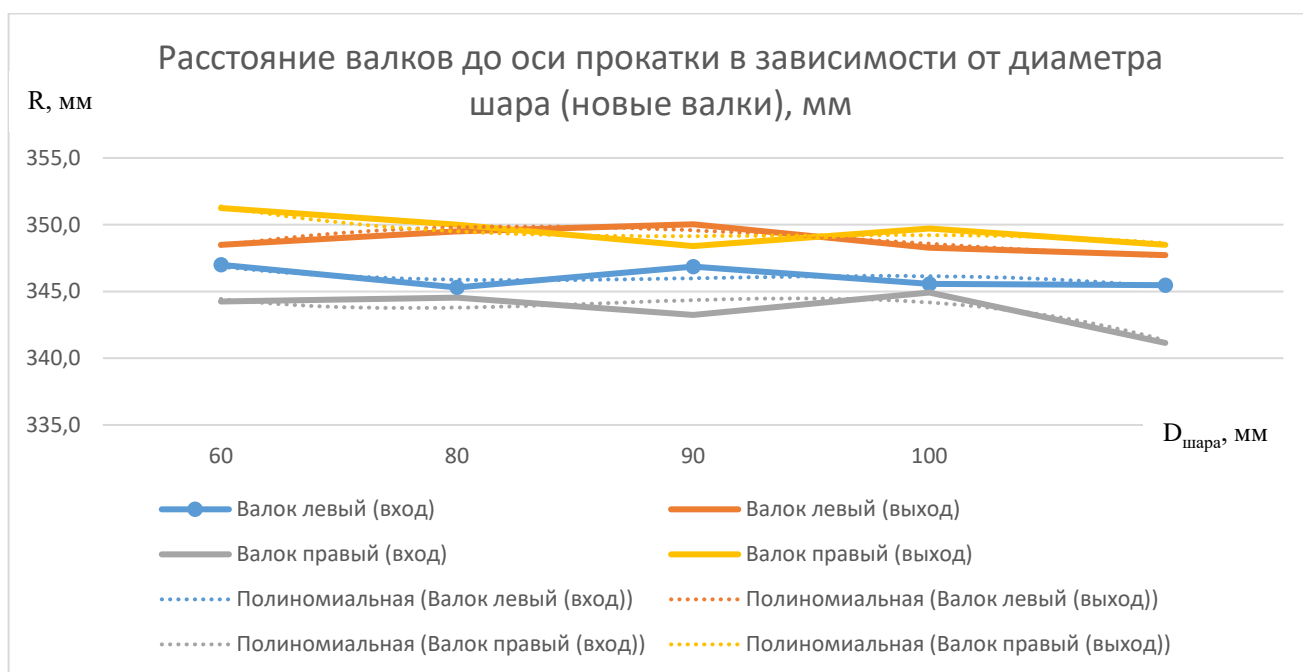


Рисунок 3.5 - График настроечных параметров на новых валках,

R – расстояние валков от оси прокатки, $D_{\text{шара}}$ – диаметр шара

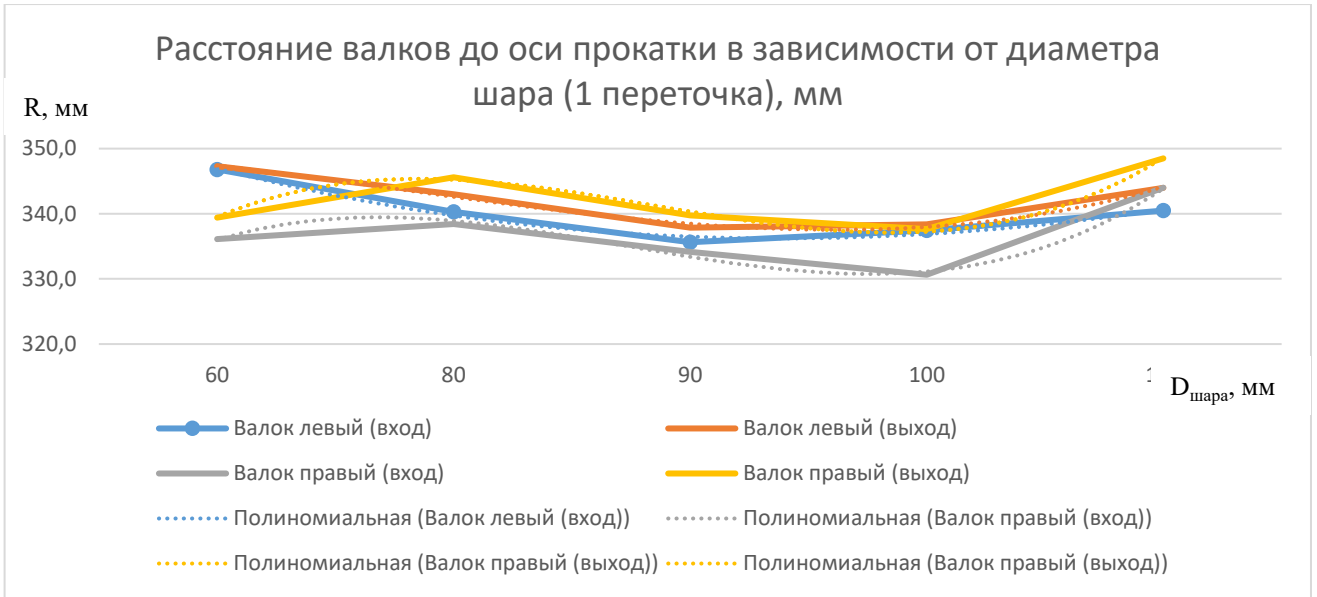


Рисунок 3.6 - График настроечных параметров на валках после первой переточки

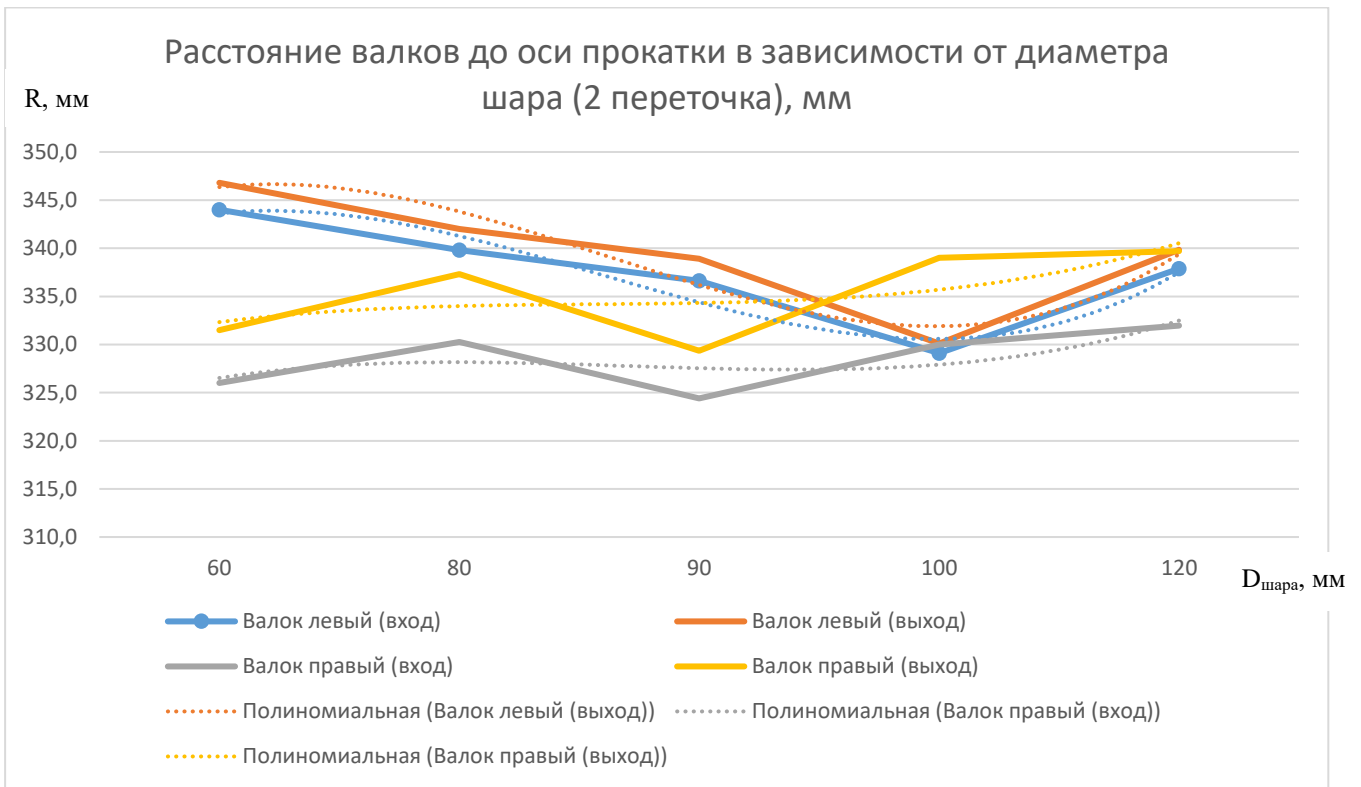


Рисунок 3.7 - График настроечных параметров на валках после второй переточки

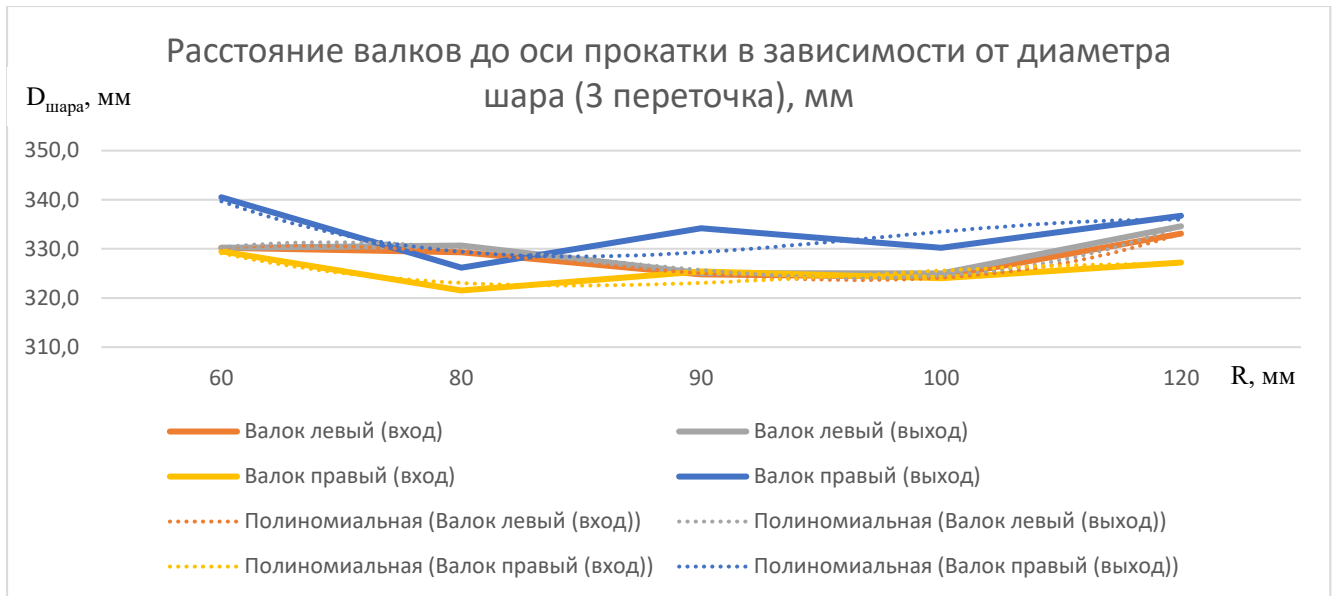


Рисунок 3.8 - График настроечных параметров на валках после третьей переточки

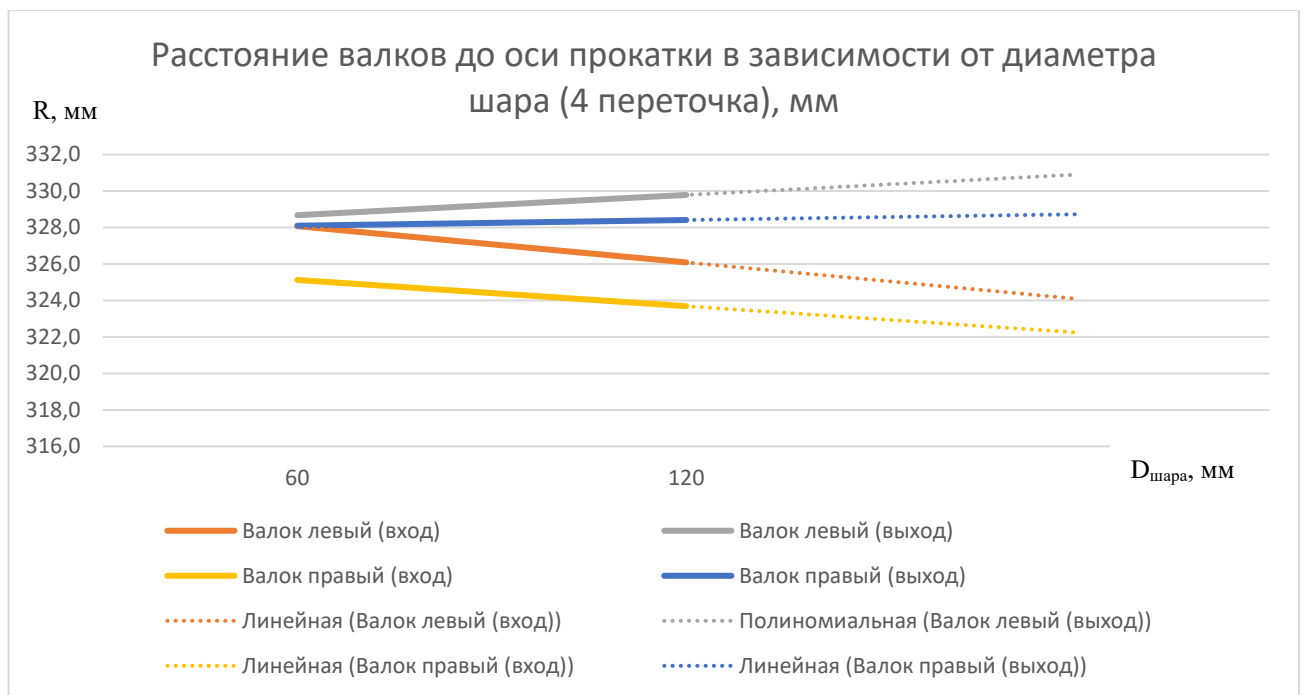


Рисунок 3.9 - График настроечных параметров на валках после четвертой переточки

Графические зависимости угла расположения валков от диаметра шара, указаны на рисунках 3.10-3.14. Углы наклона правого и левого валков одинаковые.

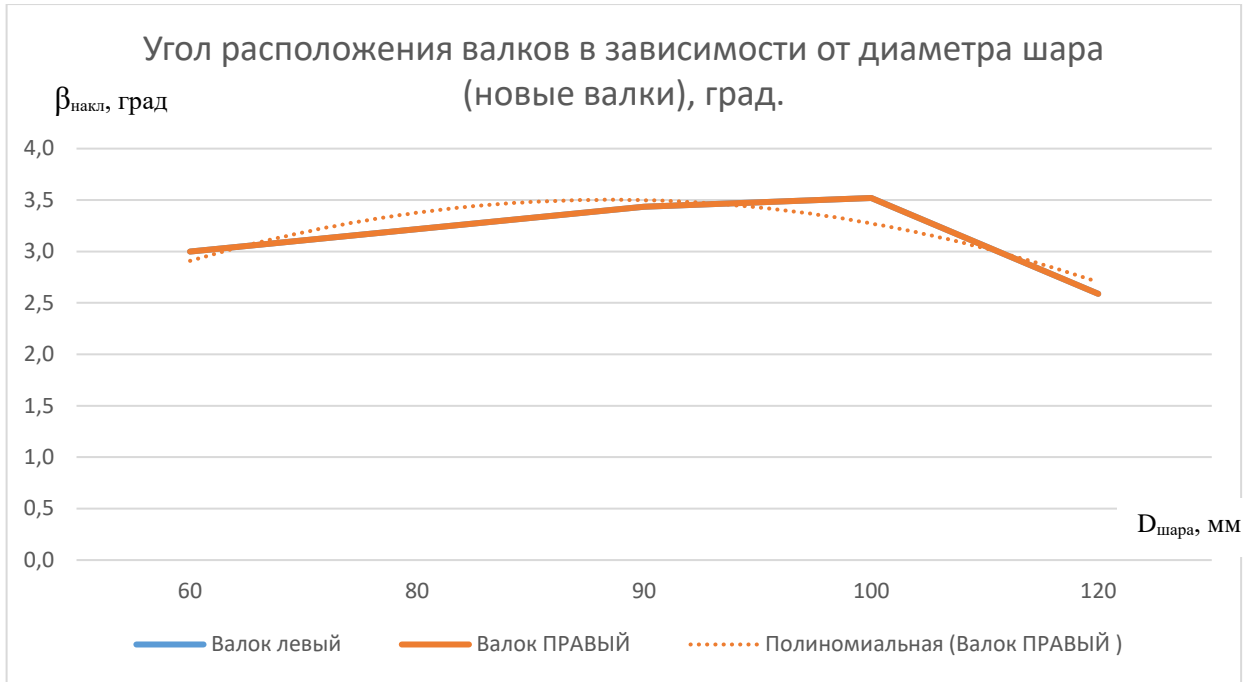


Рисунок 3.10 - График угла расположения новых валков

β_{накл} – угол наклона расположения левого и правого валков

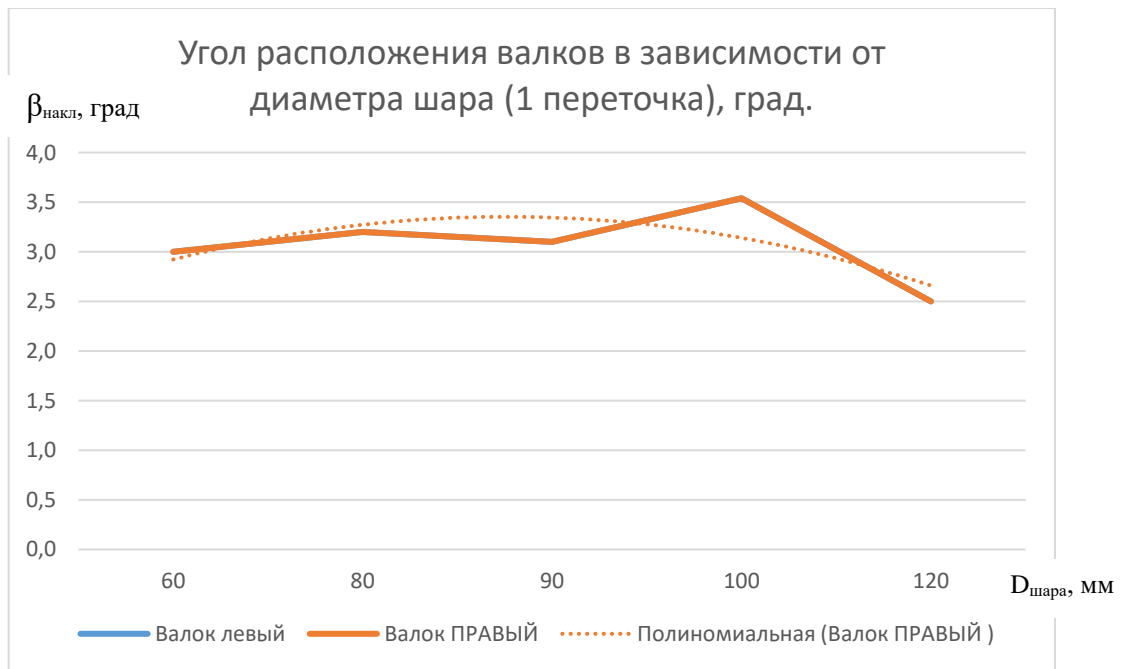


Рисунок 3.11 - График угла расположения валков после первой переточки

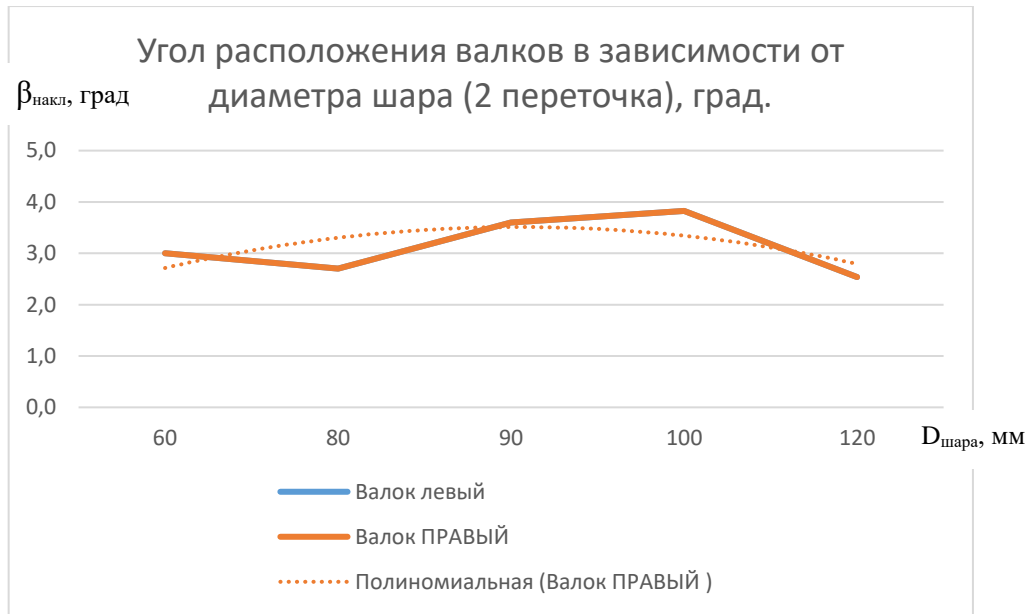


Рисунок 3.12 - График угла расположения валков после второй переточки

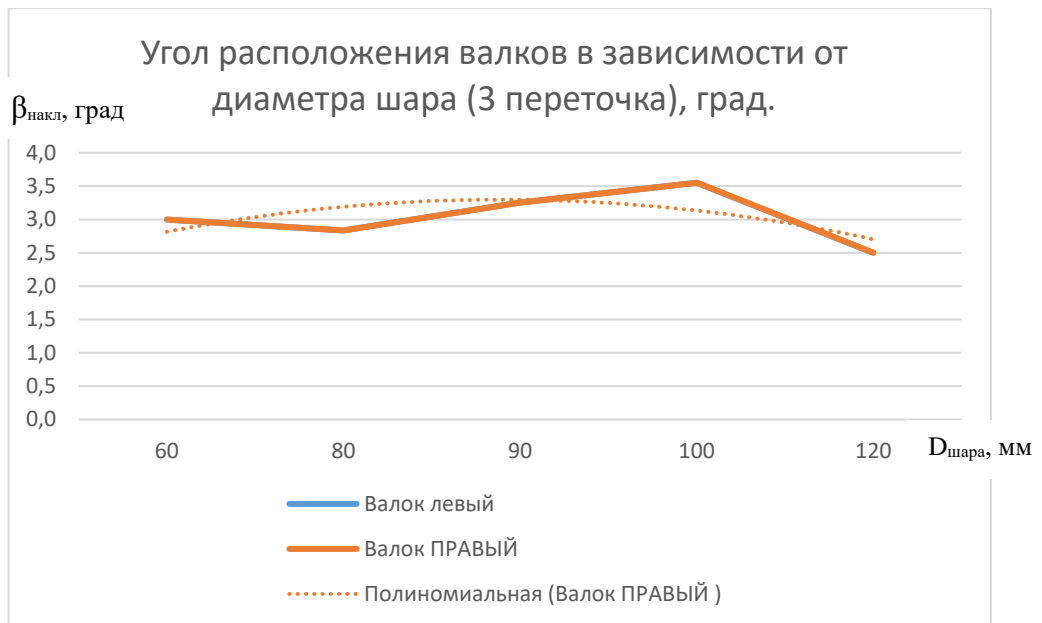


Рисунок 3.13 - График угла расположения валков после третьей переточки

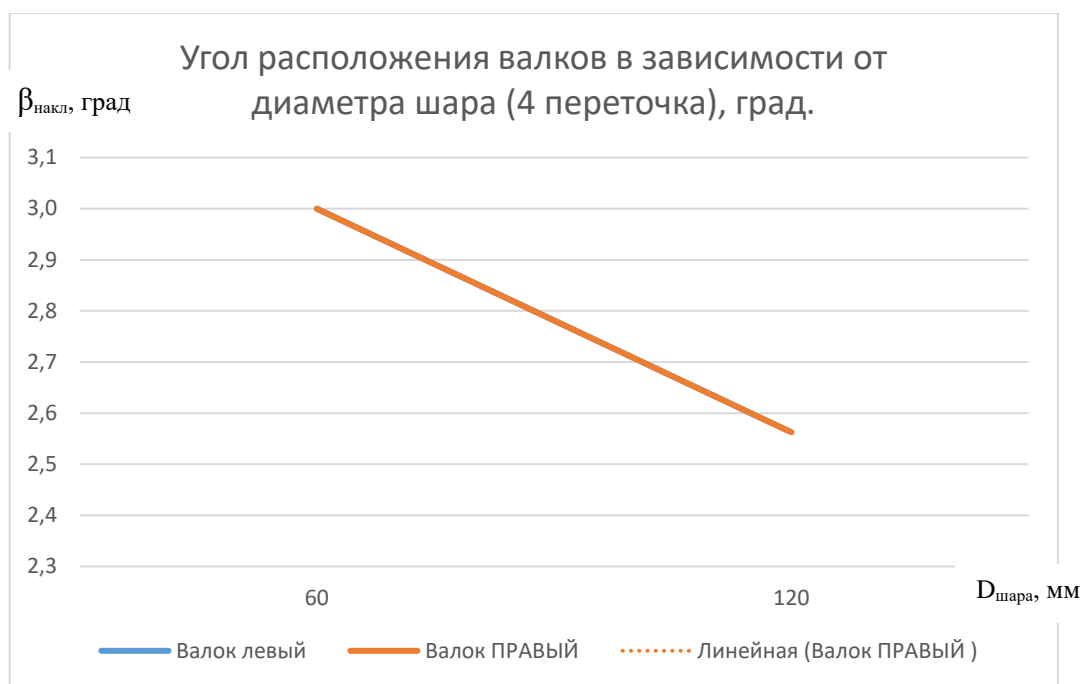


Рисунок 3.14 - График угла расположения валков после четвертой переточки

Полученные зависимости настроечных параметров от диаметра прокатываемого шара аппроксимированы. Определены уравнения функций настроечных параметров, которые приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Уравнения функций настроечных параметров

	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)	$D_{\text{п}} = 0,4 d^3 - 3,0714 d^2 + 8,0786 d + 326,92$
		Левый (вход)	$C_{\text{л}} = 1,2729 d^3 - 9,9098 d^2 + 18,467 d + 333,8$
		Левый (выход)	$D_{\text{л}} = 1,4042 d^3 - 10,966 d^2 + 20,53 d + 335,38$
	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)	$C_{\text{п}} = -0,6042 d^3 + 6,6613 d^2 - 21,801 d + 344,86$
		Правый (выход)	$D_{\text{п}} = -0,9903 d^3 + 11,034 d^2 - 36,442 d + 366,09$
		Левый (вход)	$C_{\text{л}} = 1,0833 d^3 - 8,0798 d^2 + 15,62 d + 321,61$
		Левый (выход)	$D_{\text{л}} = 1,3111 d^3 - 10,098 d^2 + 21,041 d + 318,05$
	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)	$C_{\text{п}} = -1,4375 d + 326,56$
		Правый (выход)	$D_{\text{п}} = 0,3125 d + 327,79$
		Левый (вход)	$C_{\text{л}} = -1,9875 d + 330,06$
		Левый (выход)	$D_{\text{л}} = 1,1125 d + 327,56$
	Угол расположения валков		$\beta = -1,4375 d + 326,56$

Полученные уравнения позволяют определить рациональные настроечные параметры шаропрокатного стана при освоении шаров промежуточных размеров. С учетом вновь полученных данных уравнения регрессии могут быть уточнены.

Статистическая значимость уравнений и коэффициентов регрессии проверена по критерию Фишера и Стьюдента. Проверка показала статистическую значимость.

Применение результатов исследования в условиях шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ-НТМК» подтверждается актом о результатах использования «Методики определения рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана», представленным в Приложении.

3.4. Выводы

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

2. 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 [5]. По результатам анализа определены рациональные настроечные параметры, гарантирующие производство шаров с удовлетворительными показателями формы и размеров, качества поверхности, а также исключаящие недопустимые дефекты.

3. 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.

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

4 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

Повышенные требования к твердости вызывают необходимость тщательной проработки технологического процесса прокатки и термической обработки шаров и возможность оценки тех или иных потребительских свойств готового изделия в зависимости от параметров технологического процесса.

Одним из способов такой проработки является компьютерное моделирование технологического процесса с помощью МКЭ. Компьютерное моделирование процессов пластического деформирования, в том числе процессов прокатки и штамповки получило очень широкое распространение как в науке, так и в промышленности. Компьютерное моделирование процессов термической обработки, в силу ряда причин, в частности сложности определения граничных условий и свойств материала, получило меньшее распространение, особенно в промышленности. В связи с этим актуальной новаторской задачей является прогнозирование характеристик в зависимости от химического состава стали и режимов термообработки с применением МКЭ.

4.1 Моделирование распределения температуры по сечению шара после прокатки

Целью данного исследования является определение неравномерности распределения температур по сечению и поверхности шара после прокатки для моделирования дальнейших процессов термомеханической обработки. Исследование проведено для прокатки шаров $\varnothing 100$ мм по новой калибровке (см. глава 2) с помощью пакета Deform. Постановка задачи приведена в главе 2. В результате получено распределение температур внутри шара после выхода из стана (рисунок 4.1) [103].

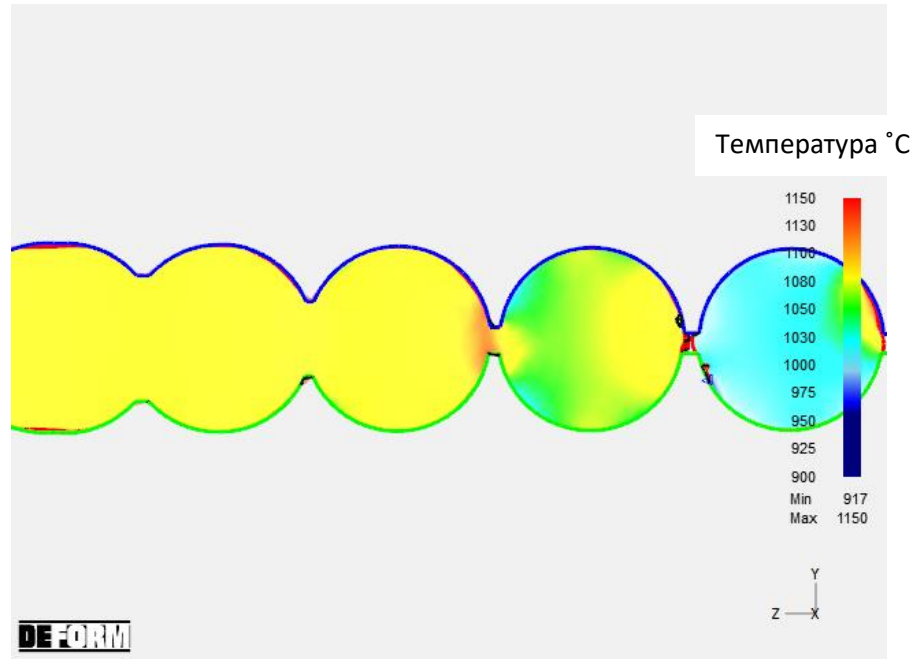
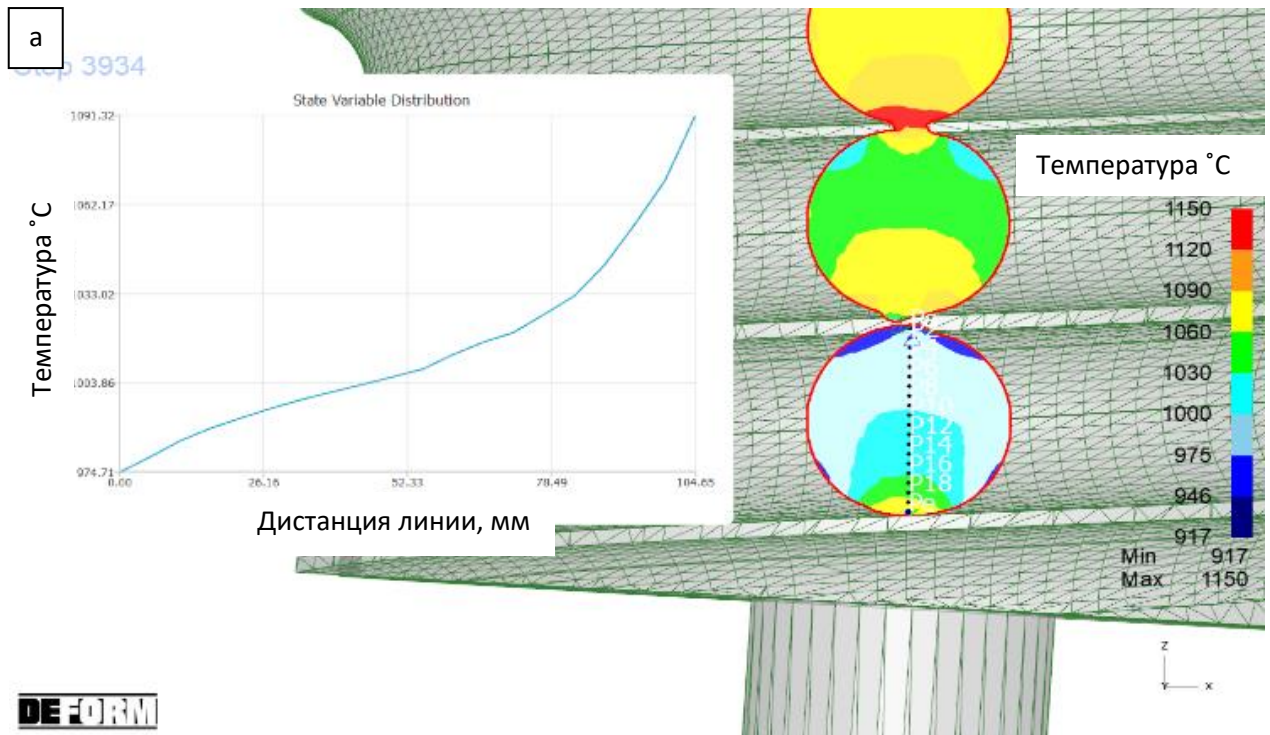


Рисунок 4.1 - Распределение температур при прокатке шаров диаметром 100 мм по новой калибровке



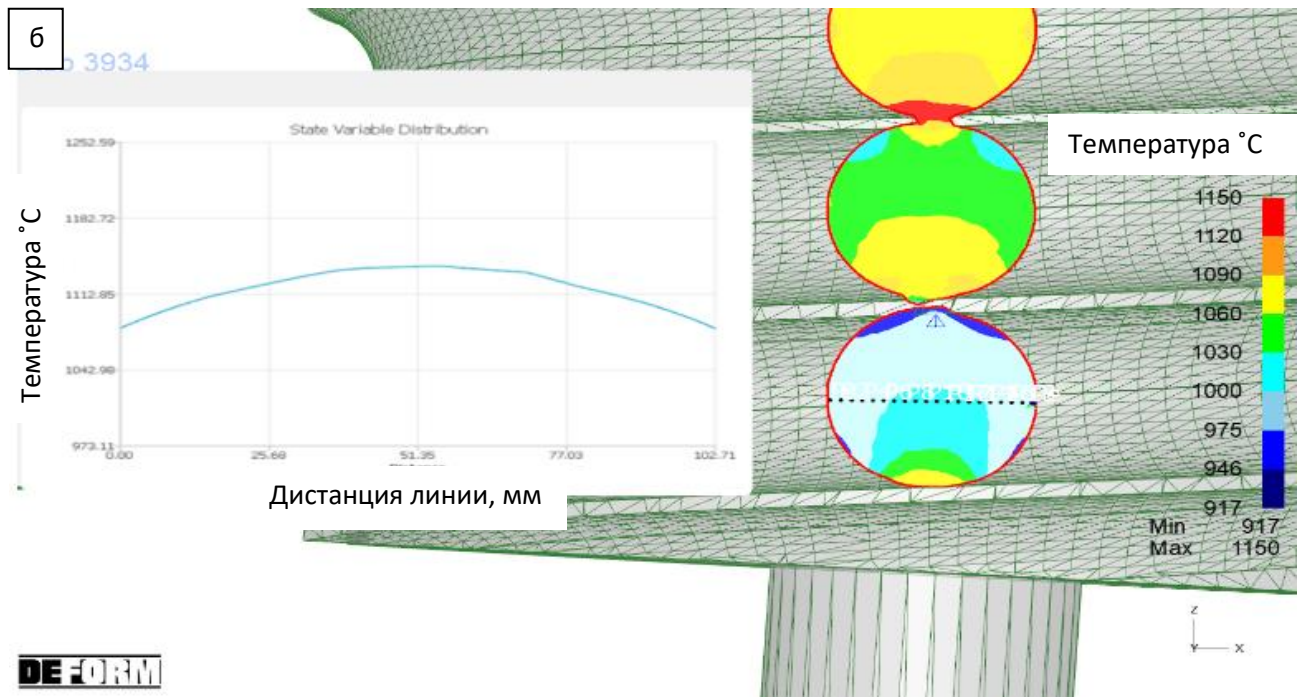
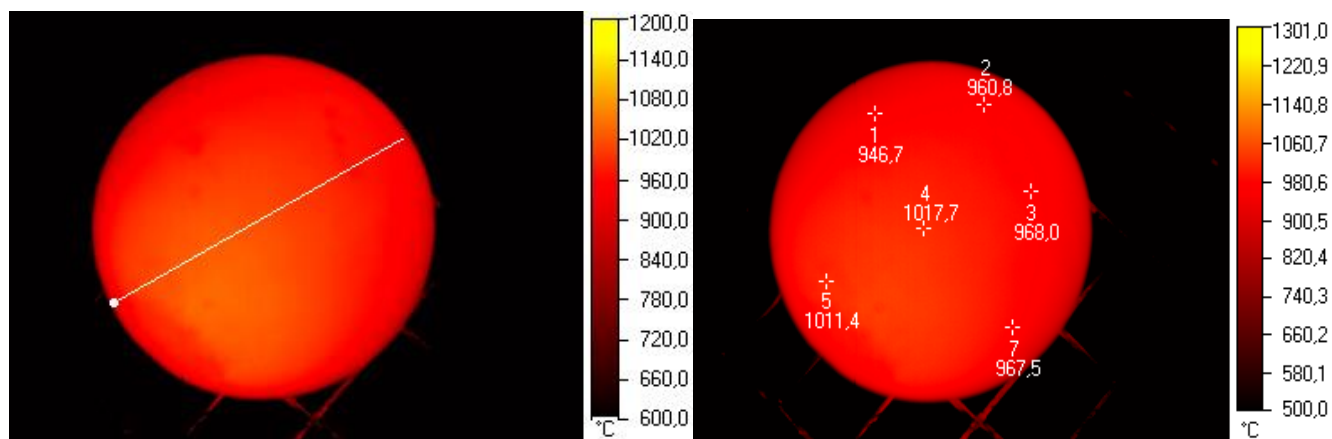


Рисунок 4.2 - Распределение температуры по сечению шара в конце прокатки а) вдоль оси проката, б) перпендикулярно оси проката

Как показало исследование распределения температурных полей на поверхности шара, непосредственно после прокатки, выявляется существенное повышение температуры от максимального радиуса к перемычкам с 974 до 1091 °C (рисунки 4.2). Выявленная разница температур (до 117 °C) наблюдается в области внедрения реборды валка в заготовку, где происходят значительные деформации [104].

Для оценки адекватности компьютерной модели проведены замеры температуры поверхности шаров после прокатки в условиях ШПС РБЦ. Замер температуры произведен при помощи тепловизора NEC M7604F серии TN9100.

Как показали результаты замеров температурных полей на поверхности шара диаметром 100 мм (рисунок 4.3) непосредственно после прокатки, выявляется существенное повышение температуры от пояска к полюсам с 946 до 1025 °C, 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. Градиент температуры поверхности шара диаметром 100 мм (рисунок 4.3) после стана составляет 79 C°.



Температура на поверхности шара по профилю линии



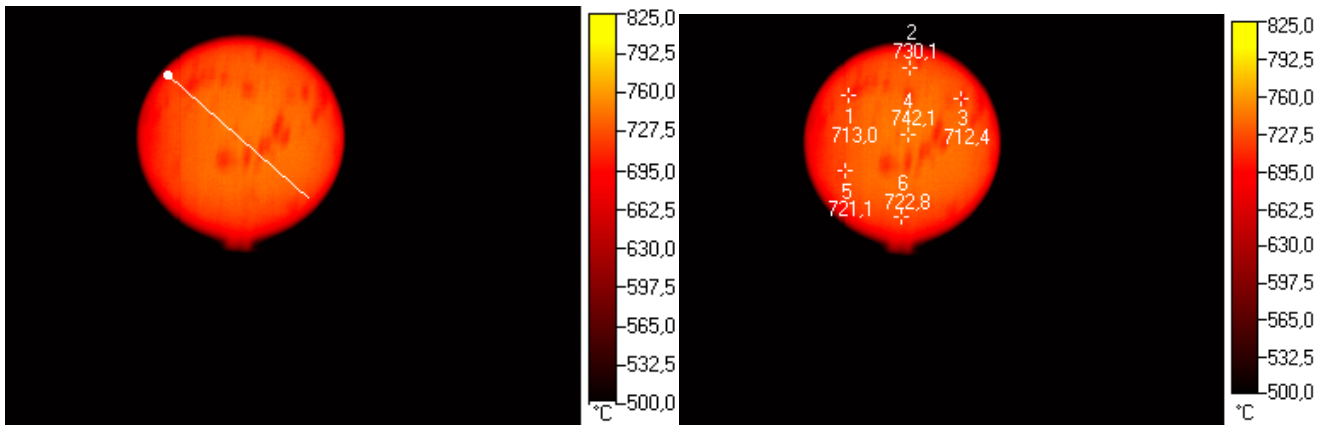
Рисунок 4.3 - Распределение температуры по поверхности шара Ø100 после стана

4.2 Определение неравномерности распределения температурного поля шара перед закалкой

Градиент температуры поверхности шара диаметром 100 мм перед закалкой – 36 °C (Рисунок 4.4). Время выравнивания температуры шара на конвейере – 150 с.

Время охлаждения шаров перед закалкой (150 с) определено по результатам моделирования изменения температуры по сечению шара при различных условиях охлаждения для достижения необходимой температуры перед закалкой.

По результатам физических замеров шаров перед закалкой с помощью тепловизора температура на поверхности составляет 740 °C.



Температура на поверхности шара по профилю линии



Рисунок 4.4 - Распределение температуры по поверхности шара $\varnothing 100$ перед закалкой

Целью экспериментов в SOLID FLOW SIMULATION является исследование выравнивания температуры шаров после прокатки и перед закалкой для подбора скоростных параметров конвейера выравнивания температуры. С помощью данной программы имеется возможность моделировать распределение температуры по сечению шара перед закалкой.

С целью исследования динамики охлаждения шара во времени (скорости охлаждения) с применением МКЭ осуществлена постановка задачи для определения градиента температуры по сечению (точки замера: центр, середина радиуса, поверхность). Время охлаждения 150 с.

Произведен расчет охлаждения шара $\varnothing 100$ мм, нагретого до 950°C , расположенного на швеллере №10, длина 200 мм на воздухе. Температура воздуха $T_{\text{в}}=25^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.5).

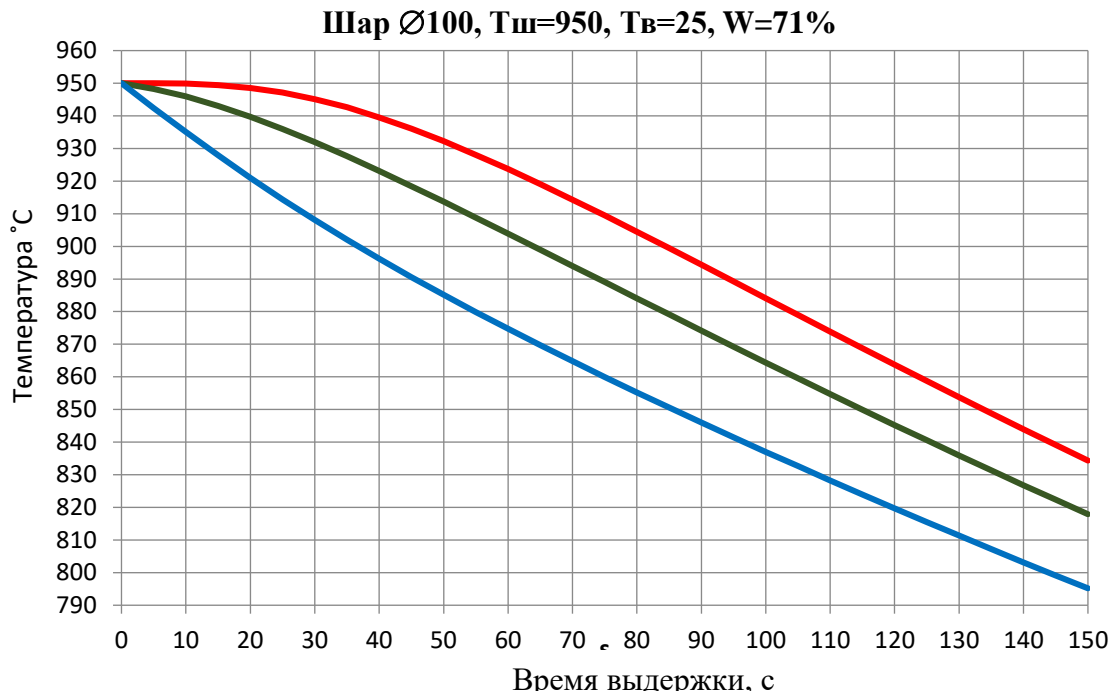


Рисунок 4.5 - Охлаждение шара Ø100 мм на воздухе, нагретого до 950°С, расположенного на швеллере №10, L=200 мм. Температура воздуха Tв=25°С. Цвет на графиках: Красный – температура центра, Коричневый – температура по середине радиуса, Синий – температура поверхности.

При моделировании процесса охлаждения шара после прокатки температура в центре шара Ø100 мм на 150 секунде охлаждения перед процессом закалки составляет 835 °С. На поверхности шара температура – 795 °С, при этом данное моделирование не учитывает внешние факторы (водянное охлаждение валков при прокате шаров, колебания температуры нагрева заготовок) влияющие на температуру поверхности, что подтверждает логику модели.

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

4.3 Исследование процесса термомеханической обработки шаров повышенной объемной твердости

Решение краевой задачи процесса термомеханической обработки шаров выполнено с применением метода конечных элементов. Метод предполагает определение термомеханического и фазового состояний в любой момент времени и в любой точке обрабатываемого тела. При этом термомеханическое состояние описывается изменением температурного поля после прокатки шаров, а фазовое состояние функциями изменения структуры металла мелющих шаров после термомеханической обработки. Расчёт термомеханического состояния (далее по тексту – ТМС) является трудной вычислительной задачей, поэтому наиболее оптимальным и точным на сегодняшний день методом является математическое моделирование с использованием специальных пакетов программ и электронно-вычислительной техники. Математическое моделирование редко используется для анализа процессов ТМС. Для МКЭ-моделирования процессов ТМС разрабатываются программные комплексы, на сегодняшний день наиболее известны следующие программы: Deform, JMatPRO. В настоящей работе для исследования ТМС процесса термомеханической обработки шаров использован программный комплекс Deform V12 (лицензия АО «ЕВРАЗ НТМК»).

Компьютерное моделирование процесса термической обработки в условиях промышленного производства имеет два основных приложения: оно позволяет инженеру понять каким образом протекает процесс, с точки зрения напряженно-деформированного состояния изделия и эволюции микроструктуры (рекристаллизации и фазовых превращений), а так же позволяет понять как изменение тех или иных параметров технологического процесса (скорость и время охлаждения, свойства охлаждающей среды, изменение хим. состава исходной заготовки и многое другое) повлияет на микроструктурные процессы и, как следствие, на потребительские свойства. Полученные результаты моделирования, как правило, не позволяют оценить количественные показатели готового изделия, ввиду уже оговоренной выше сложности определения граничных условий и свойств материала, однако позволяют оценить качественное влияние тех или иных

параметров процесса или материала и понять какие именно параметры наиболее значимы и как их следует варьировать при натурных испытаниях [106-116].

Наиболее актуальной для АО «ЕВРАЗ НТМК» задачей, над которой постоянно работают инженерные службы компании при внедрении тех или иных процессов производства, является обеспечение их устойчивости и получение качественных изделий во всем диапазоне возможных отклонений технологических параметров от номинальных. Отклонения параметров процесса или материала ограничены пределами технологических допусков, эти отклонения могут приводить к некоторой вариации потребительских свойств конечного изделия, но эти свойства всегда должны удовлетворять потребностям заказчика. При производстве шаров такими параметрами могут быть химический состав исходной заготовки, износ формообразующего инструмента, параметры закалочной среды и много другое.

Построение компьютерной модели процесса термической обработки мелющих шаров должно позволять оценивать твердость и глубину закаленного слоя шара на всем диапазоне химического состава исходной заготовки. Задача решалась на примере термической обработки шара диаметром 100 мм из стали 65С2Х (Рисунок 4.6), однако предполагаемый подход может быть применим и к другим диаметрам и другим материалам.

Стадии процесса обработки мелющих шаров и исходные данные для моделирования

Условно можно выделить 5 стадий термомеханической обработки металла при производстве шаров:

- нагрев заготовки до температуры 950 - 1050 °С для последующей прокатки;
- прокатка и формирование шаров;
- перемещение шара от участка прокатки на участок закалки и закалка в проточной воде, имеющей температуру 52 °С;
- отпуск закаленного шара в печи при температуре 250 °С в течение 240 минут;
- охлаждение шара до комнатной температуры в воде.



Рисунок 4.6 - Шары диаметров 100 мм из стали 65С2Х.

Моделирование процесса закалки

В литературе, граничные условия при моделировании процессов теплообмена, принято разделять на три группы [117]: первого рода (распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени), второго рода (значения теплового потока для каждой точки поверхности тела и любого момента времени) и третьего рода (закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой). В большей части работ, посвященной моделированию процессов термической обработки сталей [106-116, 118] используют граничное условие третьего рода и уравнение Ньютона-Рихмана. Определение коэффициента теплоотдачи для данного уравнения является отдельной сложной задачей, решаемой, как правило, экспериментально [119, 120]. В настоящей работе при моделировании процесса закалки было принято решение об использовании граничного условия первого рода, руководствуясь опытными данными АО «ЕВРАЗ НТМК» и рекомендациями работы [121]. Температура принята равномерной по поверхности шара, закон ее изменения задан в соответствии с таблицей 4.1

Таблица Для моделирования процесса отпуска коэффициент конвективной теплоотдачи, рекомендованный разработчиком программного обеспечения DEFORM для задач нагрева/ охлаждения в воздушной среде, равен 0,02 кВт/м²К.

Таблица 4.1 - Граничные условия при закалке шара в воде температурой 52 °С.

Время, с	Температура поверхности шара, °С	Скорость охлаждения поверхности шара, °С/с	Агрегатное состояние закалочной жидкости
0 – 3,5	740 – 400	97	пленочное кипение
3,5 – 4,8	400 – 80	246	пузырьковое кипение
4,8 – 240	80 – 52	0,119	конвективная теплоотдача

Для моделирования фазовых превращений и изменения свойств материала, вызванных ими, необходимо определить, каким образом эти фазовые превращения происходят. Для расчета фазовых превращений использовали изотермические диаграммы (ТТТ). На рисунке 4.7 приведены диаграммы распада аустенита при охлаждении стали 65С2Х, полученные расчетом в программном пакете для моделирования свойств сталей и сплавов JMatPro [112-124]. Из диаграммы видно, что в данном материале при термической обработке возможны следующие виды фазовых превращений: аустенит – феррит, аустенит – перлит, аустенит – бейнит, аустенит – мартенсит. Для каждой из вышеперечисленных структурных составляющих в JMatPro были рассчитаны свойства, необходимые для решения задачи нестационарной теплопроводности и механики деформируемого твердого тела в программном комплексе DEFORM, а именно:

- Семейство кривых деформационного упрочнения в широком диапазоне температур и скоростей деформации;
- Зависимость коэффициента теплопроводности и теплоемкости материала от температуры;
- Зависимость модуля Юнга, коэффициента Пуассона и коэффициента линейного термического расширения материала от температуры;
- Твердость материала по Роквеллу в каждом из фазовых состояний.

Мин. возможное кол-во легирующих элементов

Макс. возможное кол-во легирующих элементов

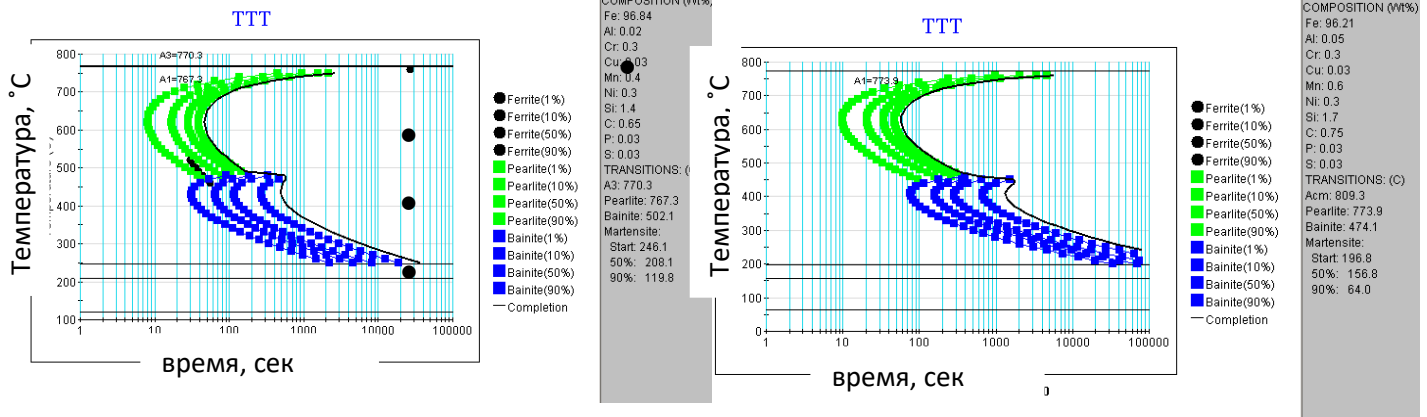


Рисунок 4.7 - Изотермические диаграммы фазовых превращений стали 65C2X с размером зерна 06 ASTM по результатам расчета в программном пакете JMatPro для при максимальном и минимальном содержании легирующих элементов :

Pearlite – кривая образования перлита;

Ferrite - кривая образования феррита;

Bainite - кривая образования бейнита.

Важным моментом является то, что значительное влияние на диаграмму фазовых переходов, и как следствие на возможность образования мартенсита при невысоких скоростях охлаждения, оказывает химический состав стали. В частности, согласно данным, приведенным в работе [125], легирующие элементы Cr и Mn повышают прокаливаемость стали, а следовательно, большее или меньшее количество углерода и легирующих добавок, в пределах допуска на химический состав стали 65C2X, приводит к смещению кривой начала образования перлита влево или вправо. На рисунке 4.9 приведены кривые начала образования перлита при максимально и минимально возможном количестве легирующих добавок и углерода в стали 65C2X. По графикам видно, что в зависимости от химического состава стали, время начала образования перлита при температуре 620 °C смещается с 8 секунды при минимально возможном количестве легирующих добавок и углерода до 10 секунды при максимальном. Наблюдаемое смещение без сомнения может оказать значительное влияние на глубину прокаливаемого слоя. Кроме того, на рисунке 4.8 видно, что увеличение количества углерода и

легирующих добавок снижает температуру начала образования мартенсита с 246 °С до 197 °С, что так же может повлиять на характер протекания технологического процесса закалки.

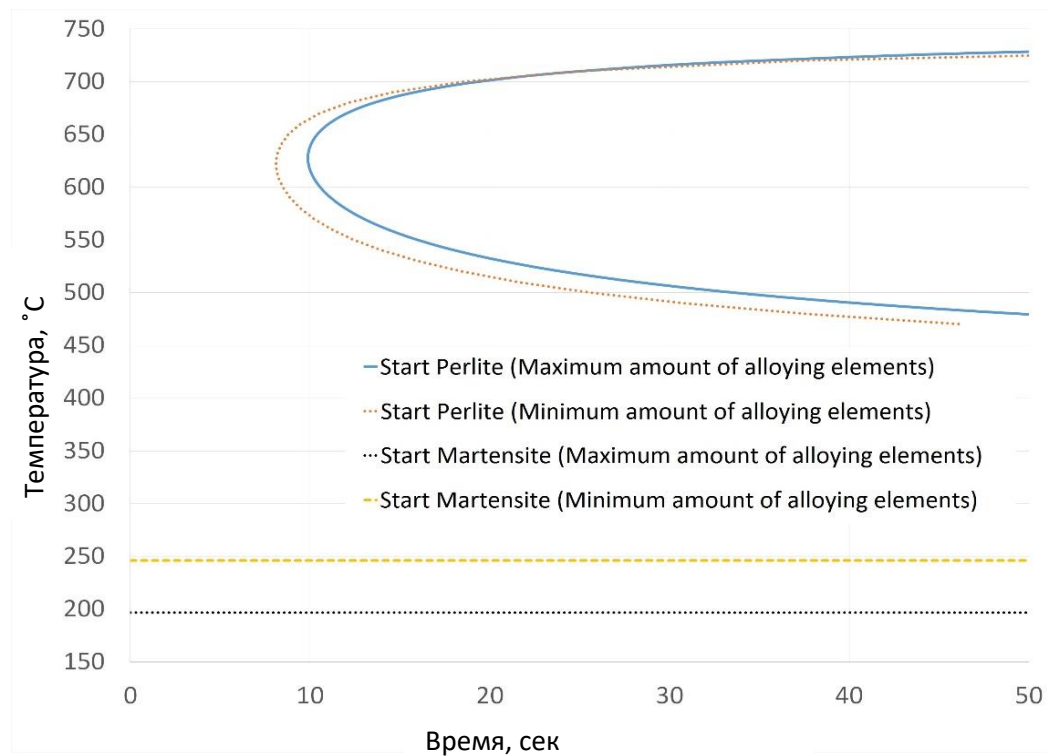


Рисунок 4.8 - Кривые начала образования перлита и мартенсита при различных хим. составах стали 65C2X (максимальное и минимальное количество легирующих элементов и углерода) по результатам расчета в программном пакете

JMatPro:

Start Perlite – кривая начала образования перлита при максимальном содержании легирующих элементов;

Start Perlite - кривая начала образования перлита при минимальном содержании легирующих элементов;

Start Martensite – кривая начала образования мартенсита при максимальном содержании легирующих элементов;

Start Martensite – кривая начала образования мартенсита при минимальном содержании легирующих элементов.

Расчет фазовых превращений с помощью изотермических диаграмм имеет ряд недостатков, подробно описанных в работе [126]. Однако для инженерных расчетов, с целью получения качественной картины фазового состава после

термической обработки подобный метод допустим и широко применяется [106,114,111]. В программном пакете DEFORM данный подход реализован с помощью уравнения Колмгорова-Джонсона-Мела-Аврами (JMAK) [127]:

$$\xi = 1 - e^{-bt^n} \quad (4.1)$$

где ξ – объемная доля фазы, получившейся при распаде аустенита, t – время, b и n – константы, (рисунок 4.11) соответствует объемной доле этой фазы равной 1% , а кривая окончания образования этой же фазы соответствует ее объемной доле равной 99%.

Моделирование процесса отпуска

Отпуск при производстве шаров используется для снятия внутренних напряжений и повышения ударной вязкости изделия. В литературе принято разделять микроструктурные процессы, проходящие в закаленном металле во время отпуска, на следующие стадии, в зависимости от температуры отпуска и химического состава стали [126].

Стадия 1. При температуре до 250 °С – выделение промежуточных карбидов, снижение объемной доли углерода в мартенсите;

Стадия 2. При температуре 200 – 300 °С – распад остаточного аустенита на феррит и цементит;

Стадия 3. При температуре 250 – 350 °С – преобразование промежуточных карбидов мартенсита в цементит и феррит;

Стадия 4. При температуре выше 350 °С – сфероидизация цементита и рекристаллизация феррита.

В процессе отпуска основную роль играет стадия 1, поэтому остальные стадии в работе не рассматриваются. Стадия 3 и 4 протекает при более высоких температурах, чем в рассматриваемом технологическом процессе. Таким образом, при построении модели отпуска закаленной стали 65C2X, рассматривается только стадия 1 и влияние процесса выпадения карбидов на механические свойства шара.

На 4.9 приведены графики роста объемной доли карбидов при различных температурах отпуска, полученные с помощью модели Simultaneous precipitation [128] программного обеспечения JMatPro.

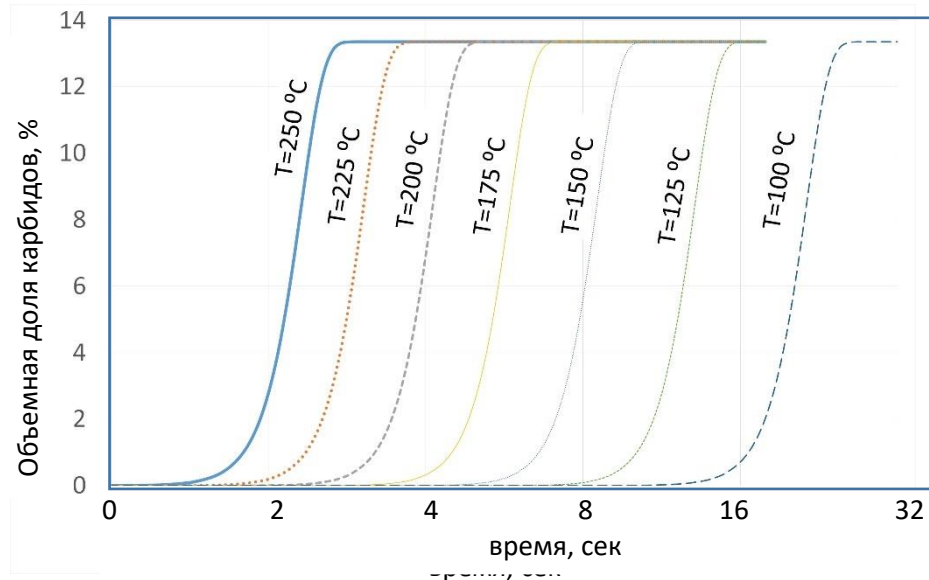


Рисунок 4.9 - Рост объемной доли карбидов при различных температурах отпуска стали 65С2Х (максимальное содержание легирующих элементов и углерода).

По полученным данным была построена диаграмма фазового перехода закалочного мартенсита в отпускаемый мартенсит (рисунок 4.10), где для каждой из приведенных на рис 4.9 температур время начала перехода соответствует времени, когда объемная доля карбидов составляет 0.1%, а время окончания – времени, когда их объемная доля достигает 13.35%.

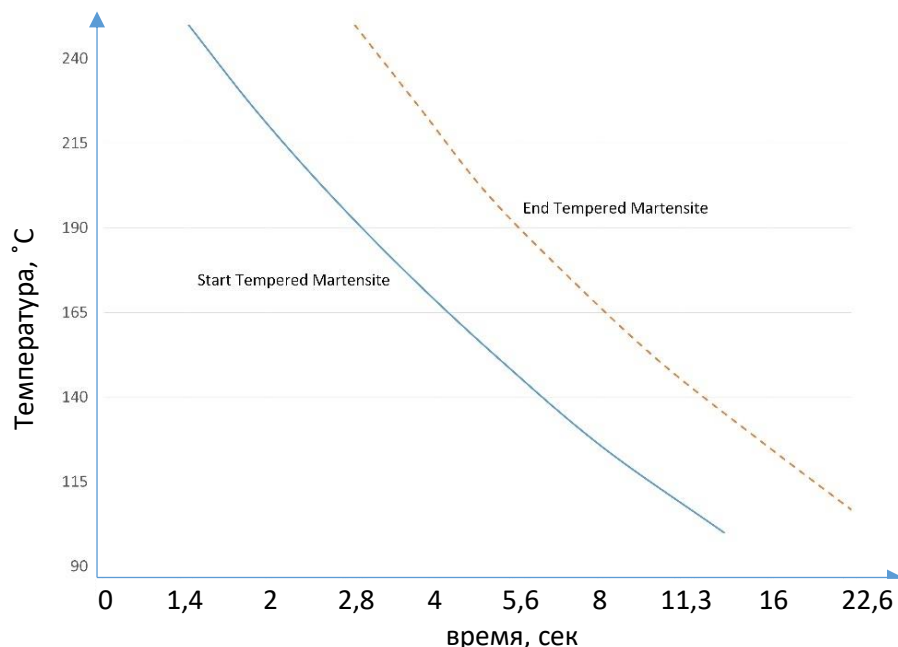


Рисунок 4.10 - Изотермическая диаграмма перехода закалочного мартенсита в отпускаемый мартенсит для стали 65С2Х (максимальное содержание легирующих элементов):

Start Tempered Martensite – кривая начала образования закалочного мартенсита;

End Tempered Martensite – кривая окончания образования закалочного мартенсита.

Аналогичные расчеты и преобразования были сделаны для случая минимально возможного количества легирующих элементов и углерода. В результате чего была получена аналогичная диаграмма перехода закалочного мартенсита в отпущенный мартенсит, которая незначительно, по сравнению с приведенной на рисунке 4.10, смещена вправо. Моделирование процесса отпуска, таким образом, сводится к расчету по уравнению (4.1) фазового состава, в процессе нагрева и выдержки заготовки в печи отпуска и определению минимально необходимого времени выдержки заготовки в печи отпуска.

Результаты моделирования

Все свойства материала, начальные и граничные условия, описанные выше, были интегрированы в программный комплекс DEFORM, была построена осесимметричная конечно-элементная модель шара диаметром 100 мм. Как было описано выше, наибольшее влияние на структурные превращения и механические свойства шара оказывают стадии закалки и отпуска. По опытным данным АО «ЕВРАЗ НТМК» температура поверхности шара на выходе из стана составляет приблизительно 1000 °С, на входе в закалочный барабан - 750 °С, т.е. весь процесс деформирования и переноса протекает в аустенитной области и никаких фазовых превращений в металле на данном этапе не происходит. Для моделирования процесса замедленного охлаждения шара на воздухе в течение 5 минут для выравнивания температуры перед закалочным барабаном, использовали граничное условие третьего рода и коэффициент теплоотдачи равный 0,02 кВт/м²К.

В результате физического и компьютерного моделирования получена неравномерность температуры по сечению шара: температура поверхности составляет 740 °С (взята по опытным данным), а температура центра шара, по которой опытных данных нет – 835 °С (получено моделированием, см. рисунок 4.5). Так же была попытка моделировать процесс закалки и отпуска с равномерной

исходной температурой шара равной 750 °С, однако данный подход показал серьезные расхождения с опытными данными по твердости и прокаливаемости шара, вследствие чего подобное допущение было признано неприемлемым.

Полученное распределение температуры по сечению шара использовалось как исходное для дальнейшего моделирования процесса закалки. В результате моделирования было получено распределение фазового состава и твердости по сечению после закалки. На рисунке 4.11 приведены кривые охлаждения материала на расстоянии 10 и 30 мм от поверхности при максимально и минимально возможном количестве легирующих добавок и углерода. По графикам видно, что при максимальном количестве добавок, на расстоянии 10 мм от поверхности шара, кривая охлаждения не пересекает кривую начала образования перлита, а на расстоянии 30 мм от поверхности не пересекает кривую окончания. Рассматривая точку на глубине 10 мм, по мартенситной фазе можно сделать вывод о начале образования закаленного слоя, который увеличивается при продолжении процесса закалки. При этом снижение температуры начала и окончания образования мартенсита ведет к большему, по сравнению со случаем минимально возможного количества легирующих добавок и углерода, количеству остаточного аустенита после закалки. В то же время более низкая теплопроводность аустенита, по сравнению с мартенситом и перлитом приводит к более медленному охлаждению шара в целом.

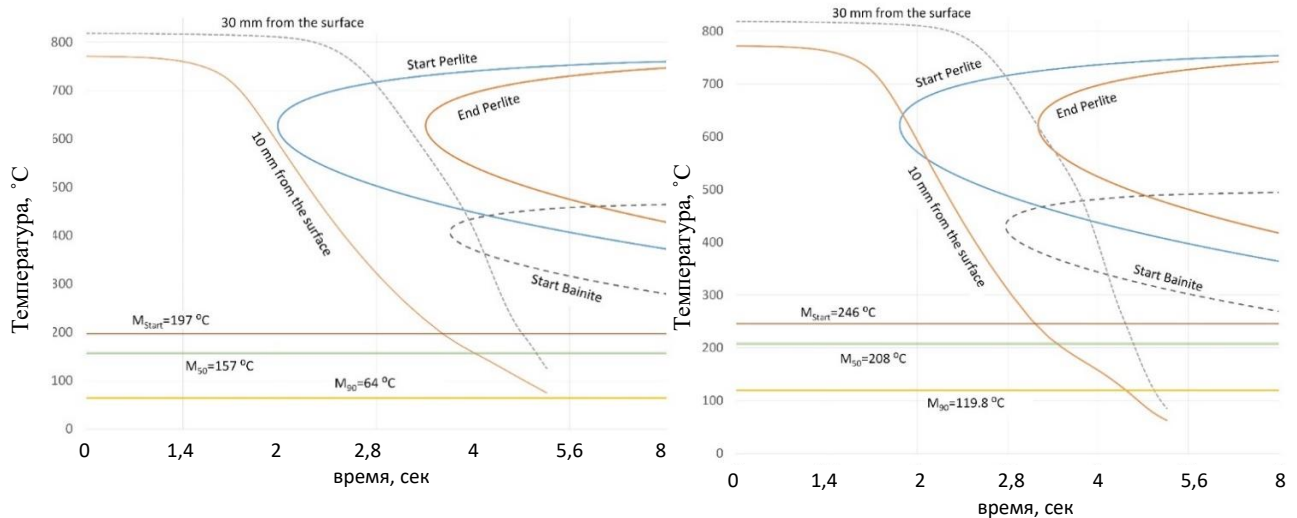


Рисунок 4.11 - Кривые охлаждения относительно диаграммы распада аустенита при максимально (слева) и минимально (справа) возможном количестве легирующих элементов и углерода:

Start Perlite – кривая начала образования перлита;

End Perlite - кривая окончания образования перлита;

Start Beinite - кривая начала образования бейнита;

M_{start} - кривая начала образования мартенсита;

30 mm from the surface – на глубине 30 мм от поверхности;

10 mm from the surface - на глубине 10 мм от поверхности.

По результатам моделирования закалки можно сделать вывод, что при минимальном количестве легирующих добавок количество остаточного аустенита минимально и за 240 секунд, в течение которых протекает закалка, закаленный слой составляет приблизительно 14 мм и в дальнейшем будет лишь протекать переход закалочного мартенсита в отпущенный мартенсит (рисунок 4.12). При максимальном же количестве легирующих добавок и углерода величина закаленного слоя составляет лишь порядка 10 мм, однако очевидно, что в дальнейшем остаточный аустенит будет переходить в мартенсит и величина слоя увеличится. Под закаленным слоем, в данной работе, понимается структура, объемная доля мартенсита в которой, составляет не менее 90%.

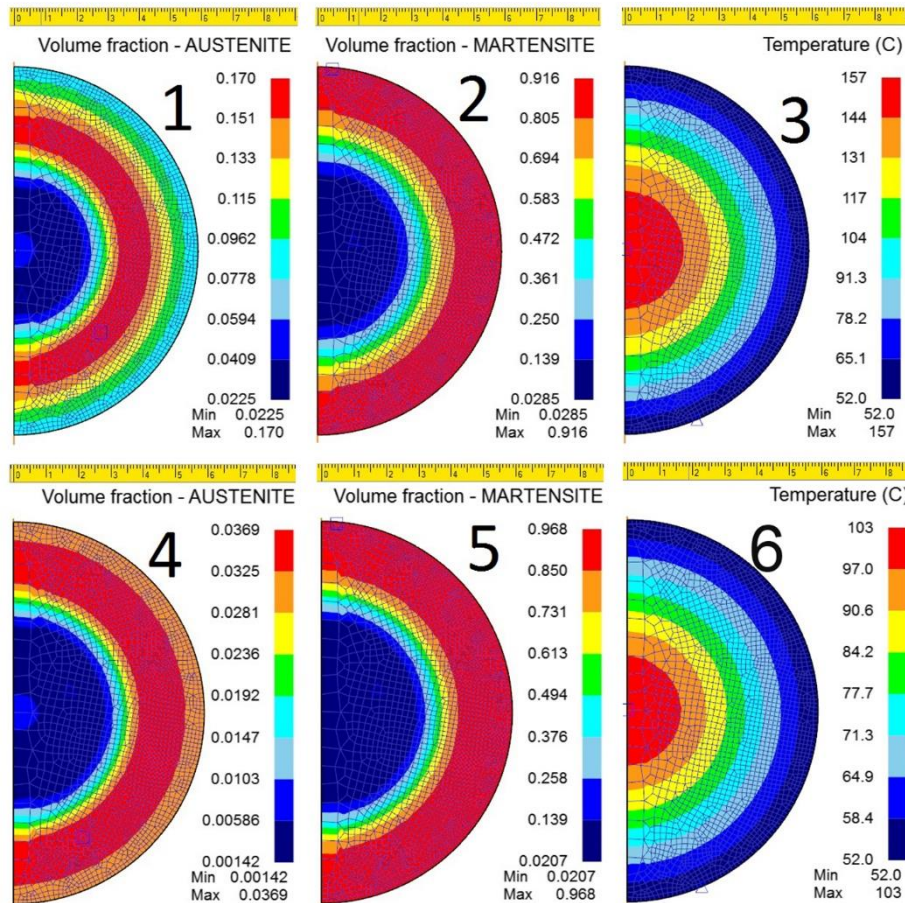


Рисунок 4.12 - Результаты моделирования процесса закалки: 1-3 при максимальном количестве легирующих элементов и углерода: 1 – объемная доля аустенита (2-17%), 2 – объемная доля мартенсита (2-91%), 3 – температура после закалки (52-157°C). 4-6 при минимальном количестве: 4 – объемная доля аустенита (0-3%), 5- объёмная доля мартенсита (2-96%), 6 – температура после закалки (52-103°C).

Далее проводили моделирование процесса отпуска и последующего охлаждения шара на воздухе. Исходное распределение температуры брали из результатов моделирования закалки. Отпускная печь имеет 9 зон. Температура в первой и девятой зонах составляет приблизительно 200 °C, в 2-8 – приблизительно 250 °C. На рисунке 4.13 приведен график изменения температуры в процессе отпуска в точках, лежащих на расстоянии 10 мм и 30 мм от поверхности, а также непосредственно на поверхности. По графику видно, что в процессе отпуска температура шара выравнивается и приблизительно через 120 секунд составляет 97°C. Далее температура постоянно растет и через приблизительно 22 минуты

пересекает кривую начала образования отпускаемого мартенсита. Окончательно переход закалочного мартенсита в отпускаемый мартенсит происходит через приблизительно 40 минут. Далее температура продолжает расти и в самом конце отпуска пересекает кривую начала образования бейнита из остаточного аустенита, что, впрочем, не приводит к образованию сколько-нибудь существенной его объемной доли.

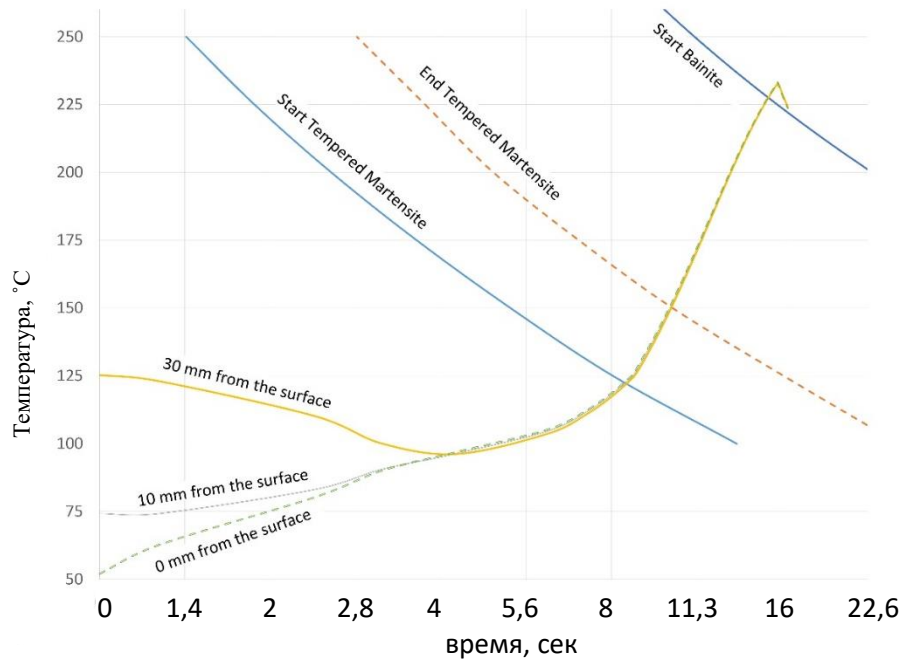


Рисунок 4.13 - Кривые охлаждения относительно диаграммы перехода закалочного мартенсита в отпускаемый мартенсит при максимально возможном количестве легирующих элементов и углерода:

- Start Tempered Martensite – кривая начала образования мартенсита закалки;
- End Tempered Martensite – кривая окончания образования закалочного мартенсита;
- 30 mm from the surface – на глубине 30 мм от поверхности;
- 10 mm from the surface - на глубине 10 мм от поверхности;
- 0 mm from the surface - на поверхности.

Далее моделировали процесс охлаждения шара на воздухе. Использовали граничное условие третьего рода и коэффициент теплоотдачи равный $0,02 \text{ кВт/м}^2\text{К}$. Охлаждение центра шара до температуры ниже M_{90} (температура окончания перехода аустенита в мартенсит) происходит приблизительно за 120 минут. В случае максимально возможного количества легирующих добавок и углерода в процессе охлаждения большая часть остаточного аустенита переходит в

закалочный мартенсит, в случае же минимального, распада не происходит, ввиду малого количества остаточного аустенита. В результате получили (Таблица 4.4.2) распределение твердости по сечению шара, которую сравнивали с таблицей, полученной в ходе натуральных испытаний [5].

Объемную твердость HRC_{vol} рассчитали по следующей формуле [1]:

$$HRC_{vol} = 0.289 HRC_{surf} + 0.436 HRC_{0.25R} + 0.203 HRC_{0.5R} + 0.063 HRC_{0.75R} + 0.009 HRC_{center} \quad (4.2)$$

где HRC_{surf} , $HRC_{0.25R}$, $HRC_{0.5R}$, $HRC_{0.75R}$, HRC_{center} – значения твердости на поверхности и на соответствующих расстояниях от поверхности шара в долях радиуса и в центре шара.

Экспериментальная твердость измерялась согласно методике ГОСТ 7524-2015, расчетная твердость HRC_{sim} измерялась по правилу смеси, т.е. задавалась твердость каждой из фаз материала, и общая твердость в точке рассчитывалась как:

$$HRC_{sim} = \sum Ph_{sim} HRC_{Ph} \quad (4.3)$$

где Ph_{sim} – объемная доля той или иной фазы (отпущенный мартенсит, закалочный мартенсит, перлит и т.д.), HRC_{Ph} – твердость той или иной фазы.

Таблица 4.2 - Распределение твердости по сечению шара

Хим. состав стали 65C2X	Твердость на поверхности, HRC		Твердость на 1/2 радиуса шара, HRC		Объемная твердость, HRC	
	модель	эксп.	модель	эксп.	модель	эксп.
Максимальное количество легирующих элементов и углерода	58	57-60	36	37-40	51	43-47
Минимальное количество легирующих элементов и углерода	57		22		46	

В таблице 4.3 приведены данные по твердости каждой из фаз, полученные расчетами в программном пакете JMatPro, а также данные по глубине закаленного слоя шара. Как видно из таблицы, величина закаленного слоя, при любых отклонениях химического состава стали, не должна быть менее 15 мм, что отвечает техническим требованиям нормативной документации по шарам.

Таблица 4.3 - Твердость фазовых составляющих стали 65С2Х и глубина закаленного слоя шара

Хим. состав стали 65С2Х, %	Твердость фазы, НРС						Глубина закаленного слоя, мм	
	Аустенит	Перлит	Бейнит	Феррит	Закалочный мартенсит	Отпущенный мартенсит	Моделирование	Эксперимент
Максимальное количество легирующих элементов и углерода	21	21	54	10	64	58	17	16..20
Минимальное количество легирующих элементов и углерода	19	16	48	8	62	57	16	-

Возвращаясь к таблице 4.2 можно увидеть серьезную разницу в твердости шара на глубине 0.5R от поверхности (на глубине 30 мм). Анализ фазового состава при закалке и отпуске стали 65С2Х различного химического состава представлен на рисунке 4.14. По графику видно, что значительная разница в твердости на глубине 30 мм вызвана значительной разницей фазового состава после термической обработки. В частности, при минимально возможном количестве легирующих добавок и углерода на расстоянии 30 мм объемная доля перлита составляет 83%, отпущенный мартенсит – 16%, а остальных фаз – менее 1%. При максимально же возможном, на этом же расстоянии, объемная доля перлита составляет 60%, отпущенного мартенсита – 33%, закалочного мартенсита – 6%, а остальных фаз чуть более 1%.

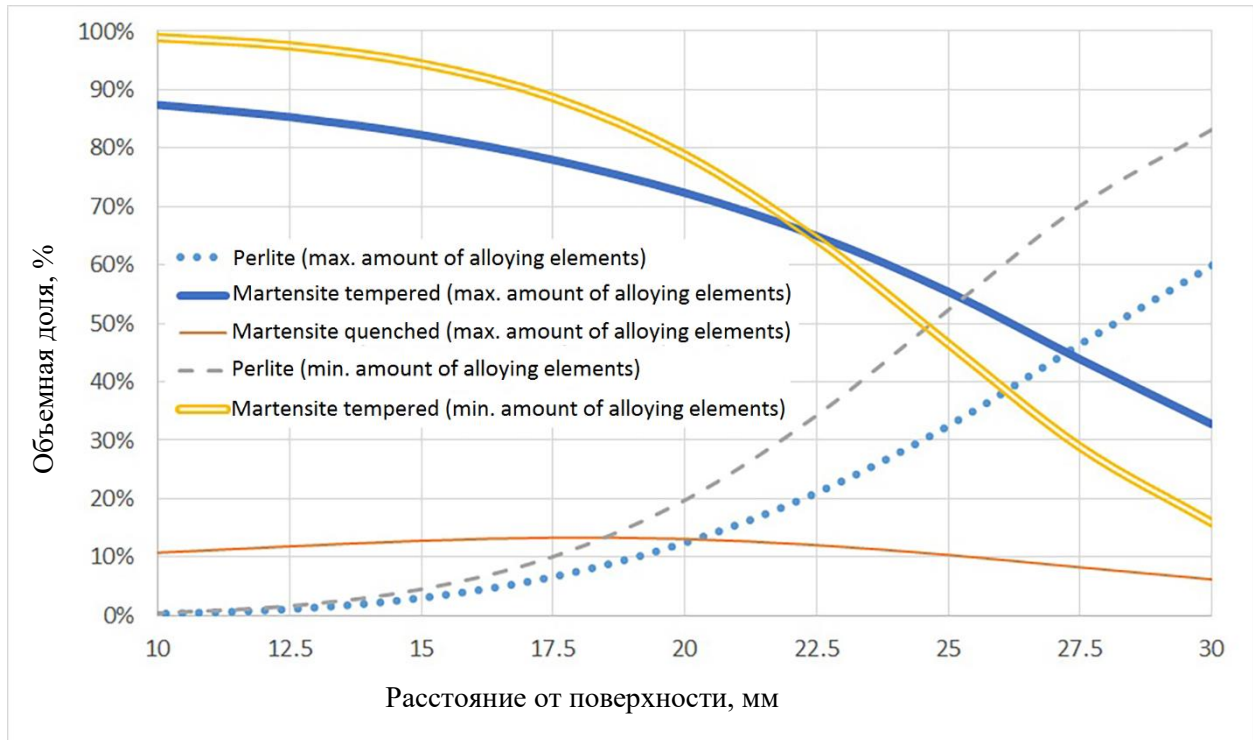


Рисунок 4.14 - Объемная доля перлита, мартенсита закалки и отпущенного мартенсита на расстоянии от 10 до 30 мм от поверхности шара:

Perlite (max.amount of alloying elements) – содержание перлита (максимальное содержание химических элементов);

Martensite tempered (max.amount of alloying elements) – закалочный мартенсит (максимальное содержание химических элементов);

Martensite quenched (max.amount of alloying elements) - отпущенный мартенсит (максимальное содержание химических элементов)

Perlite (min.amount of alloying elements) – перлит (минимальное содержание химических элементов)

Martensite tempered (min.amount of alloying elements) - закалочный мартенсит (минимальное содержание химических элементов).

Моделирование процесса термомеханической обработки шара диаметром 100 мм из стали марки 65C2X показало, что твердость поверхности шаров составит не менее 57 HRC, а объемная твердость не менее 46 HRC, что удовлетворяет требованиям 5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015.

4.4 Исследование процесса термомеханической обработки мелющих шаров из легированных марок стали

На основе разработанной модели процесса термомеханической обработки шара диаметром 100 мм из стали марки 65С2Х разработана технология термомеханической обработки шаров для легированных марок [129-136].

С целью отработки производства опытной партии и отгрузки потребителю мелющих шаров повышенной объемной твердости проведена опытно-промышленная работа. Для проведения ОНР приняты марки стали – с повышенным содержанием углерода, марганца и хрома 70ХГС, 60ГР и с повышенным содержанием кремния 65С2Х (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 - Химический состав марок стали 70ХГС, 60ГР и 65С2Х.

Марка стали	Массовая доля элементов в стали, %									
	С	Si	Mn	Al	S	P	Ni	Cu	Cr	В
					Не более					
60ГР	0,60- 0,66	0,15- 0,30	0,75- 0,90	0,02- 0,05	0,035	0,035	0,300	0,30	Не более 0,30	0,002- 0,005
65С2Х	0,65- 0,75	1,40- 1,70	0,40- 0,60	0,02- 0,05	0,030	0,030	0,300	0,03	0,20- 0,30	-
70ХГС	0,70- 0,75	0,60- 0,70	0,85- 0,95	0,02- 0,05	0,030	0,030	0,200	0,25	0,25- 0,35	-

Для производства шаровой заготовки используется непрерывно-литая заготовка прямоугольного сечения, из металла, прошедшего обязательное вакуумирование. В прокатных цехах из НЛЗ производится цилиндрическая заготовка соответствующего диаметра.

Производство мелющих шаров производилось в соответствии с установленными технологическими параметрами [137]:

- температура нагрева заготовки перед станом 930 – 1030 °С;
- температура шаров после стана 930 - 1000 °С;
- температура шаров перед закалкой 730 - 820 °С;

- температура воды в закалочном барабане – $42 \pm 2^\circ\text{C}$;
- температура охлаждения шара - $25 \pm 5^\circ\text{C}$;
- температура отпуска шаров – $180\text{-}250^\circ\text{C}$;
- время выдержки в отпускной печи – 240 мин;

Партии шаров каждой марки стали разделены на 5 групп [138-144]:

- 1 группа производилась без охлаждения на участке охлаждения готовых шаров (УОГШ) перед упаковкой с выдержкой на воздухе;
- 2 группа производилась без охлаждения на УОГШ с выдержкой в изолированной среде;
- 3 группа производилась с охлаждением на УОГШ;
- 4 группа производилась с последующим испытанием на копре;
- 5 группа производилась с повторными испытаниями на копре.

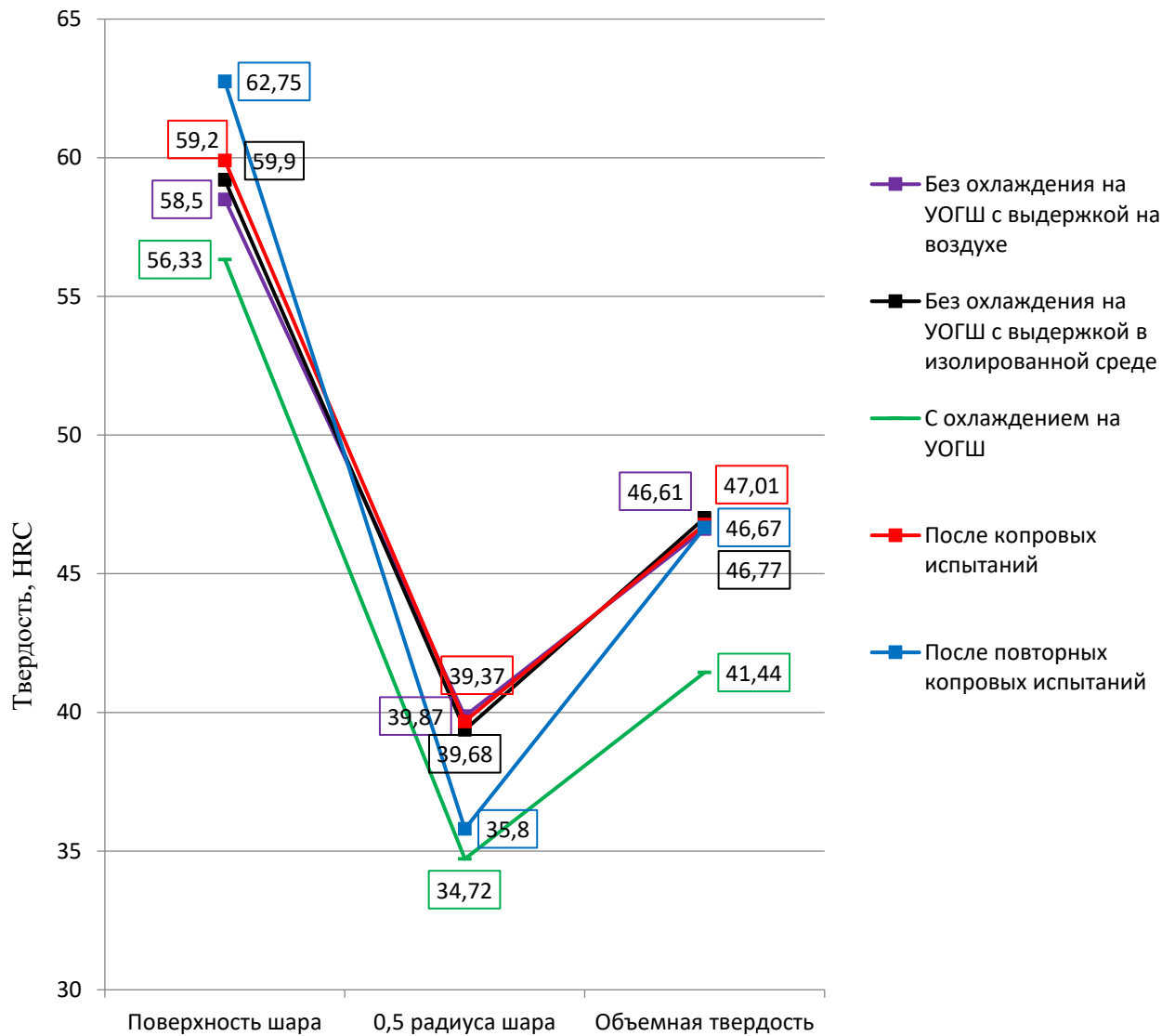


Рисунок 4.15 - Твердость шаров диаметром 100 мм из стали марки 60ГР (средние значения по группам)

При контроле макроструктуры мелющих шаров диаметром 100 мм из стали марки стали 60ГР недопустимых дефектов и трещин напряжения не обнаружено. Глубина закаленного слоя составила 16-20 мм (рис 4.16).



Рисунок 4.16 - Макроструктура шаров диаметром 100 мм из стали марки 60ГР

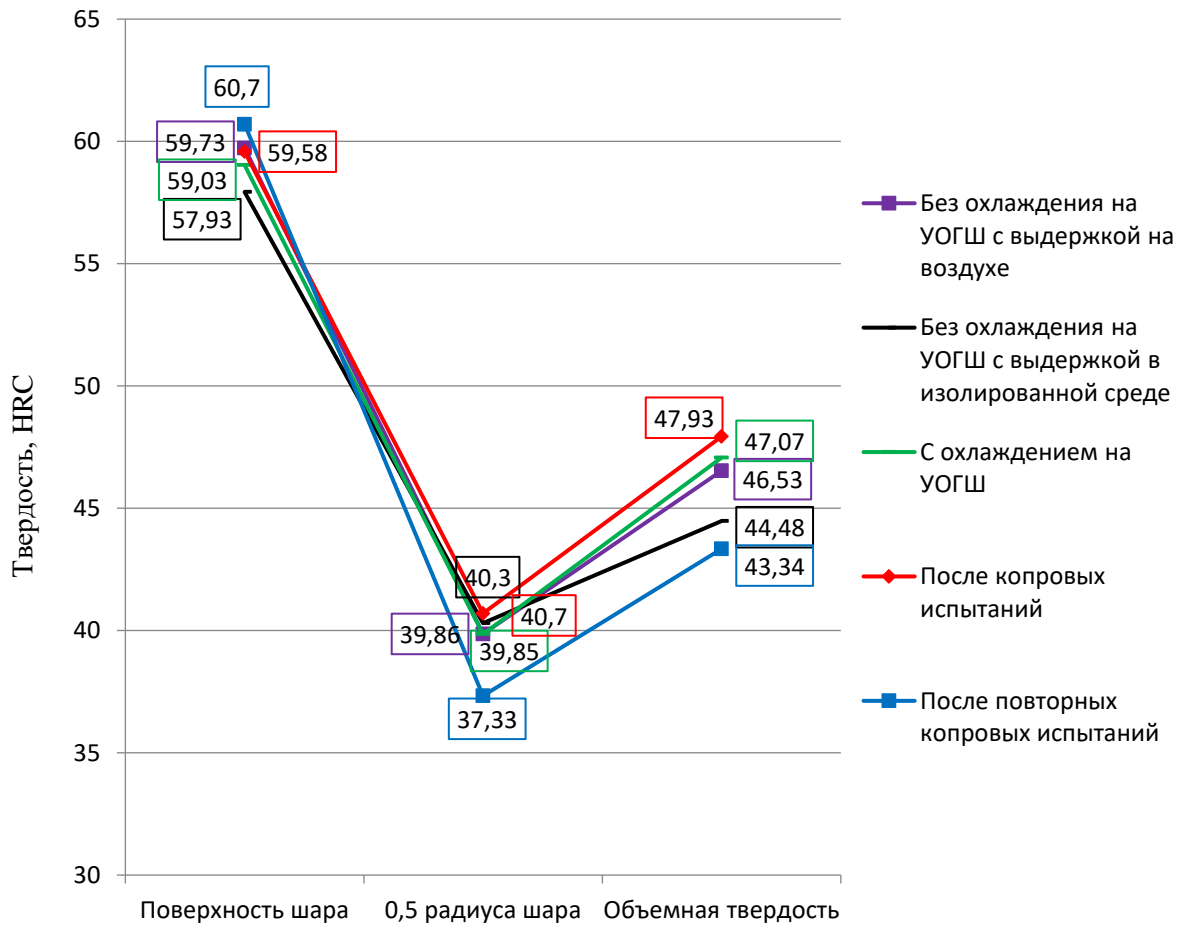


Рисунок 4.17 - Твердость шаров диаметром 100 мм из стали марки 65С2Х (средние значения по группам)

При контроле макроструктуры мелющих шаров диаметром 100 мм из стали марки стали 65С2Х недопустимых дефектов и трещин напряжения не обнаружено. Глубина закаленного слоя составила 14-18 мм (Рис 4.18).



Рисунок 4.18 - Макроструктура шаров диаметром 100 мм из стали марки стали 65С2Х

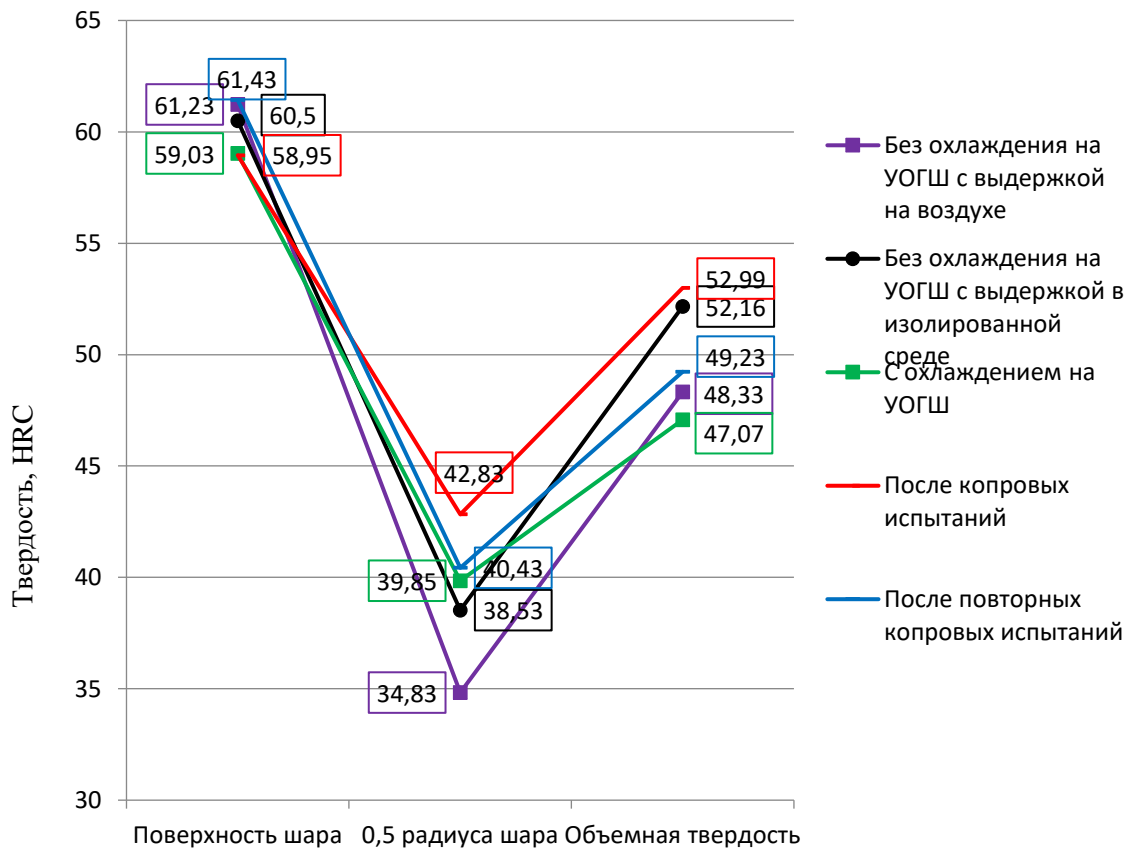


Рисунок 4.19 - Твердость шаров диаметром 100 мм из марки стали 70ХГС (средние значения по группам)

При контроле макроструктуры мелющих шаров диаметром 100 мм из стали марки стали 70ХГС недопустимых дефектов и трещин напряжения не обнаружено. Глубина закаленного слоя составила 18-31 мм (Рисунок 4.20).



Рисунок 4.20 - Макроструктура шаров диаметром 100 мм из стали марки стали 70ХГС

По результатам аттестации мелющих шаров имеется подтверждение на соответствие техническим требованиям 4 и 5 групп твердости по [5] (Рисунки 4.15, 4.17, 4.19) [145-146].

По согласованию опытно-промышленные партии направлены потребителю АО «Полюс» для использования мелющих шаров при измельчении руд цветных металлов. Мелющие шары загружались в шаровые мельницы совместно с специалистами АО «ЕВРАЗ НТМК». По результатам использования мелющих шаров 5-ой группы твердости по [5] потребитель получил улучшенные результаты по удельному расходу шаров (Таблица 4.5) и увеличил объем поставок.

Полученные результаты подтверждаются актом о результатах использования технологии производства мелющих шаров повышенной объемной твердости, представленным в Приложении. Получен патент на способ производства мелющих шаров 5 группы твердости [147], представленный в Приложении.

Таблица 4.5 - Расчет расхода шаров по проценту износа шара

Помольные шары				Износ, %		Вес мелющих тел, т	Износ мелющих тел (по расчет по убыли), т	количе ство часов работы шаров ой мельни	количес тво перера ботанно й руды, то нн	Расход шаров на 1 тонну руды, кг/т
Среднее по замерам		Средний износ		по диаметр у	по массе. %					
Вес ,грамм	Ø,мм	Вес ,грамм	Ø,мм			2	3	4	6	7
экспериментальные шары - шаровая мельница № 9										
4670	105,1					44,5				
3787	95,68	883	9,44	8,98	18,91	36,09	8,414	528	35041	0,240
традиционно используемые шары - шаровая мельница № 6										
4631	104,1					42,91				
3847	94,15	784	9,95	9,56	16,93	35,65	7,264	542	27683	0,262
китайские используемые шары - шаровая мельница №23										
4016	99,81					43,861				
2787	92,56	1229	7,25	7,2638	30,6	30,44	13,423	673,3	37347	0,359

4.5 Выводы

1 Для оценки адекватности компьютерной модели проведены замеры температуры поверхности шаров после прокатки в условиях ШПС РБЦ. Замер температуры произведен при помощи тепловизора NEC M7604F серии TH9100.

С помощью программного комплекса SOLID FLOW SIMULATION проведено исследование выравнивания температуры шаров после прокатки для 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 °С (от центра к поверхности).

2 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 65C2X

показало, что при всех возможных разбросах химического состава исходной заготовки, твердость поверхности шаров, мелющих составит не менее 57,08 HRC, а объемная твердость не менее 46,39 HRC, что удовлетворяет требованиям 5-ой группы твердости по [5]. Построенная модель процесса термомеханической обработки позволяет учитывать неравномерность распределения температур по сечению шара после процесса прокатки на шаропрокатном стане.

3 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 объемной твердости 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 [5]. По согласованию опытно-промышленные партии направлены потребителю. По результатам использования мелющих шаров 5- ой группы твердости по [5] потребитель получил улучшенные результаты по удельному расходу шаров и увеличил объем поставок.

4 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 объемной твердости.

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 шаропрокатного 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 шаропрокатного стана может быть усовершенствована.

2 Произведен расчет калибровки прокатных валков шаропрокатного стана для производства шаров 100 мм. На основе расчета 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.

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;
- снижение тангенциальных напряжений приводит к снижению износа реборд;
- 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 в осевой зоне шара – «шапка».

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. Объем партии- 2000т.

Получены следующие результаты прокатки опытной партии:

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

-вертикальный угол наклона валков уменьшен до 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.

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 исключая 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, которая позволяет оценивать фазовый состав и твердость мелющего шара после термической обработки. Моделирование процесса закалки шара диаметром 100 мм из стали марки 65C2X показало, что при всех возможных разбросах химического состава исходной заготовки, твердость поверхности мелющих шаров составит не менее 57,08 HRC, а объемная твердость не менее 46,39 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.

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 объемной твердости.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленный В.К. Выбор материала и технологий термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа// Сталь. 2017. № 6. С.64-69.
2. Сычков А.Б., Стеблов А.Б, Березов С.Н О выборе материала и режимов термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка/ Литье и металлургия 2013, №3.
3. Уманский А.А., Головатенко А.В., Щукин А.Г., Симачев А.С. Исследование влияния параметров закалочной микроструктуры мелющих шаров, произведенных методом поперечно-винтовой прокатки, на их эксплуатационные характеристики. Производство проката, 2019. № 3. С.34-39.
4. Серов А. И., Смирнов Е. Н., Скляр В. А., Белевитин В. А. Промышленные испытания мелющих шаров повышенной твердости при измельчении железистых кварцитов Обогащение руд. 2017. №3. С. 3-4.
5. ГОСТ 7524 2015 Международный стандарт. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. Технические условия.- М.: Стандартинформ, 2016.
6. В.Ю. Рубцов Совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки и технологии производства мелющих шаров. УРФУ ,2021, С
7. A.Tofil, Z. Pater Overview of the research on roll forging process // Advances in Science and Technology Research Journal Volume 11, Issue 2, June 2017, pp. 72-86.
8. Патент Германии №42849 от 04.04.1888 г.
9. Hodge G O. Machine for forming balls. US №1665361 (10.04.1928).
- 10.Klamp P. Mill for rolling articles of circular section and irregular profile US №2060087 (10.11.1936).
- 11.Патент Японии JP1372968 от 01.03.1968 г.
- 12.Грановский С.П., Громов А.А., Ефанов, В.И. Прокатка шаров // Сталь. 1956. №4.

13. Специальные прокатные станы / А.И.Целиков, М.В.Барбарич, М.В.Васильчиков и др. М.: Metallurgiya, 1971. 336 с.
14. Шор Э.Р. Новые процессы прокатки. М.: Metallurgizdat, 1960. 387 с.
15. Котенок В.И. Создание эффективных калибровок шаропрокатных валков и расширение сортамента шаров на действующих и новых станах / В.И.Котенок, С.И. Подобедов // Труды 3 Конгресса прокатчиков, Липецк. 19-22 октября 1999 М.: ОАО «Черметинформация». - 2000. - С. 438-441.
16. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. М.: Metallurgiya. 1980. 116 с.
17. Восканьянц А.А., Иванов А.В. Моделирование процессов холодной поперечно-винтовой прокатки методом конечных элементов // Производство проката. 2004. №11. С. 10-17.
18. Shi Xiao-min, Wang Bao-yu, Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling // Materials Science Forum. 2012. 151-154 pp.
19. Hatzfeld, Lutz, "Mannesmann, Reinhard" in: Neue Deutsche Biographie 16 (1990), S. 62 f.
20. Haibo Yang, Lijie Zhang and Zhenghaun Hu The Analysis of the Stress and Strain in Skew Rolling // Advanced Materials Research. 2012. 1650-1653 pp.
21. Yang, S.-C.; Chen, C.-K. The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 215. 2001. 523-532 pp.
22. Chang Shu, Jitai Wang, Xuedao Shu, Duanyang Tian Influencing Factors of Void closure in Skew-Rolled Steel Balls Based on the Floating-Pressure Method // Materials. №12. 1391. april 2019. pp. 1-15. Hatzfeld, Lutz, "Mannesmann, Reinhard" in: Neue Deutsche Biographie 16 (1990), S. 62 f.

23. Chang Shu, Jitai Wang, Xuedao Shu, Duanyang Tian Influencing Factors of Void closure in Skew-Rolled Steel Balls Based on the Floating-Pressure Method // *Materials*. №12. 1391. april 2019. pp. 1-15.
24. Cuihua Liu, Zhiping Zhong, Zhi Shen Influence of reduction distribution on internal defects during crosswedge-rolling process // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP. 2014. pp. 263-267.
25. Cuping Yang, Zhenghuan Hu. Research on the ovality of hollow shafts in cross wedgerolling with mandrel // *Int J Adv Manuf Technol*. 2016. pp. 67-77.
26. Zbigniew Pater Analisis of helical rolling process of balls formed a head of a scrapped rail // *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume №30. June 2016. pp. 110-114.
27. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Tomask Bulzak A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails // *Procedia Manufacturing* 11. 2017. pp. 466-473.
28. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak FEM modeling of a helical wedge rolling process for ax-isymmetric parts // *Advances in Science and Technology Research Journal*. Volume 12. Issue 1. March 2018. pp. 115-126.
29. Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk A helical wedge rolling process for producing a ball pin // *Procedia Manufacturing* 27, 2019. pp. 27-32.
30. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Tomasz Bulzak Cavity formation in cross-wedge rolling processes // *J. Iron Steel Res. Int*, 2018. pp. 1-10.
31. Z. Pater, A. Gontarz, W. Weronki New method of thread rolling // *Journal of Materials Processing Technology* 153-154, 2004. pp. 722-728.
32. J. Tomczak, Z. Pater, J. Bartnicki skrew rolling of balls in multiple helical impression // *Archives of metallurgy and materials* Volume 58, - Issue 4. 2013. 1071-1076.
33. Z. Pater A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls // *METABK* 55(2), 2016. pp. 233-236.

34. P. Chyla, Z. Pater, J. Tomczak, P. Chyla Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls // Arch. Metall. Mater., Vol. 61, №2, 2016. 485-492.
35. Janusz Tomczak, Zbigniew Pater, Tomasz Bulzak The Effect of Process Parameters in Helical Rolling of Balls on the Quality of Products and the Forming Process // Materials. October 2018. pp. 1-15.
36. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Tomasz Bulzak An Innovative Method for Forming Balls by Cross Rolling // Materials September. 2018. 1-14.
37. Рубцов В.Ю. Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных профилей / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2019. – №15. – С. 24-36.
38. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Jaroslaw Bartnicki, Tomasz Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls // Metals, October 2018. pp. 1-14.
39. M. Houska, M.-I. Rotarescu Experimental and finite-element analysis of axial feed bar rolling (AVQ) // Advanced Technology of Plasticity, Vol. II. 1999. pp. 1523-1528.
40. D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko Modeling ball rolling in spiral rolls // Mechanics and Advanced Technologies, Vol 83, №2. 2018. pp. 24-30.
41. Перетяцько В.Н., Климов А.С., Филипова М.В., Федоров А.А. – В кн.: Металлургия, технология, управление, инновации, качество. Сб. науч, тр, СибГИУ. – Новокузнецк:, изд. СибГИУ, 2010. С.255-257.
42. Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства// Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С.78-86.

43. Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы// Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С.26-33.
44. Кузьмин В.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали// Вестник Приазовского государственного технического университета. 2011. № 2 (23). С.117-126.
45. Чиж Е.В., Абенова М.Б. Выбор и анализ технологии изготовления мелющих тел//Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 С.26-33.
46. Вдовин К.Н., Фоктистов Н.А., Абенов М.Б., Куликов В.Д., Кондратьев И.С. Качество мелющих шаров, изготовленных различными методами // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 78-81.
47. Кирюшин А.В., Шестаков И.А. Влияние твердости шаров на измельчения руд в шаровых мельницах // Обогащение руд. 1990. №5. С. 3-4.
48. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров// Изв.вузов. Черная металлургия. 2002. №1. С 41-46.
49. Игнатов В.А., Солёный В.К., Ярмоленко А.И. и др. Выбор и разработка рациональной формы мелющего тела для измельчения сырья и материалов // Металл и литье Украины. 2002. № ½. С 23-27.
50. Зеликович А.Я., Токмаков А.М. Улучшение качества термически обработанных шаров // Сталь. 1994 № 2. С 64-65.
51. В.С. Смирнов, В.П. Анисифоров, М.В. Васильчиков, С.П. Грановский, И.И. Казанская, А.Д. Кузьмин, Н.В. Мехов, И.С. Победин. Поперечная прокатка в машиностроении – Москва: Государственное научно-техническое управление, 1957. – с. 200-217.
52. А.П. Сичевой, С.С. Зозулин Упрощение калибровки и технологии изготовления многозаходных валков с винтовыми калибрами для прокатки

- шаров. Сборник научных статей №37. Машины агрегаты для производства труб и проката. – Москва, 1974. – с 175—179,
53. *С.С. Зозулин* Многозаходная калибровка валков для прокатки шаров. Бюллетень ЦИИНЧМ, № 22, 1967, стр. 42 – 44.
54. Шварц Д.Л., Галимьянов И.К., Семенов А.А. Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных марок стали. *Металлург.* 2022. № 1. С. 79-84.
55. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. М : Стандартинформ, 2010. – 8 с.
56. Рубцов В.Ю. Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, Н.М. Загребайлов // Молодежь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.): в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – Т.1. – С. 18-23.
57. Рубцов В.Ю. Влияние размеров бочки шаропрокатного вала на качество шара / В.Ю. Рубцов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. - Т. 1. - С. 90-93.
58. Рубцов В.Ю. Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, Н.М. Загребайлов // Молодежь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.): в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – Т.1. – С. 18-23.
59. Рубцов В.Ю. Освоение производства мелющих шаров 5 группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК»/В.Ю. Рубцов, О.И.Шевченко // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции.

- Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018. - Т.1. – С. 117-118.
- 60.Способ производства шаров : пат 2167020 Рос. Федерация : МПК 51 В21К1/02; В21Н 1/14 / С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов ; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический - № 99119246/2; заявл. 01.09.1999 ; опубл. 20.05.2001 – 8с.
61. Способ изготовления шаров и устройство для его осуществления Авторское свидетельство SU 609583 А1 : МПК 51 В21Н1/14 / Г.В. Андреев, Е.М. Макушок, В.Я. Шукин ; заявитель и патентообладатель Физико-технический институт АН БССР Заявка № 2055430 от 23.08.1974; опубл. 05.06.1978, Бюл.№21. – 2 с.
- 62.Грановский С.П. Создание, исследование и внедрение в промышленность новых станов и технологических процессов прокатки в винтовых калибрах деталей машиностроения: дис. докт. тех. наук. : 05.16.05 / Грановский Семен Павлович - М.: ВНИИМЕТМАШ. - 1975. - 381 с.
- 63.Котенок, В.И. Энергоэкономные калибровки валков шаропрокатных станов / В.И. Котенок, С.И. Подобедов // Metallurg. - 2001. -№9. - С.45-47.
- 64.Котенок, В.И. Создание эффективных калибровок шаропрокатных валков и расширение сортамента шаров на действующих и новых станах / В.И. Котенок, С.И. Подобедов // Труды 3 Конгресса прокатчиков, Липецк. 19-22 октября 1999 М.: ОАО «Черметинформация». - 2000. - С. 438-441.
- 65.Устройство к токарно-винторезному станку для нарезания винтовых поверхностей с переменным шагом Авторское свидетельство 158 837643 МПК 51 В23 G 3/10. / Н.А. Целиков, Б.Ф. Выгоднер, В.И. Котенок, А.М. Алешин, Г.М. Глазков Заявка №2813612/25-08 от 03.09.1979; опубл. 15.06.81. Бюл.№ 22. – 2 с.
- 66.Филлипова М.В. Математическое моделирование прокатки шаров / М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, В.Н. Перетягко, Е.Е. Прудский // Изв. Вуз. Черная металлургия. – 2017. – Т.60. - №7. – С. 516-521.

- 67.Разумов-Раздолов К.Л. Прогрессивные методы конструирования и технология изготовления калибров валков для поперечно-винтовой прокатки.: автореф. дисс. канд. тех. наук : 05.03.01 / Разумов-Раздолов Константин Леонидович; Тульский гос. ун-т. - Тула, 2000. – 16 с.
- 68.Филипова М.В. Усилия при прокатке шаров / Филиппова М.В., Перетятыко В.Н., Климов А.С. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. - 2011. - № 27. - С. 143-146.
- 69.Филипова М.В. Усилия и напряжения при прокатке шара / М.В. Филипова, В.Н. Перетятыко., С.В. Сметанин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2016. - Т.59. - №8. - С. 587-588.
- 70.Шварц Д.Л., Галимьянов И.К. Совершенствование двухзаходной калибровки валков для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм. Металлург. 2022. № 4. С. 60-65.
- 71.Котенок В.И. Развитие теории формообразования профилей винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин: Дис. ... д-ра техн. наук. : 05.03.05 / Котенок Владимир Иванович — Москва, 2005. — 342 с. 164 78. ГОСТ 30479-97 «Обеспечение износостойкости деталей». – М : ИПК Издательство стандартов, 1998 – 12 с.
- 72.Протасьев В.Б. Проектирование валков для горячей поперечно-винтовой прокатки заготовок без дефектов в осевой зоне / В.Б. Протасьев, Н.Н. Батова // Черные металлы. – 2020. - №3 (1059). – С. 42-47.
- 73.Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: Designing of screw impressions in the helical rolling of balls. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 14 (1), 2014, 104–113.
- 74.В. Ю. Рубцов, В. В. Курочкин, О. И. Шевченко. Моделирование прокатки мелющих шаров на валках с непрерывно изменяющимся шагом. Черные металлы. 2020, №6, 36-40.

75. В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D. Учебное пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2010.
76. В.П. Прохоренко Solid Works практическое руководство, М.: БИНОМ, 2004.
77. Шварц Д.Л., Галимьянов И.К., Семенов А.А. Компьютерное моделирование новой калибровки шаропрокатных станов двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей. *Металлург.* 2022. № 6. С. 80-84.
78. Уманский А.А. Исследование качественных характеристик помольных шаров при их производстве на стане винтовой прокатки / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова, А.С. Симачев // *Металлург.* — 2019. - №6. — С. 43-46.
79. Тетерин, П. К. Теория поперечной и винтовой прокатки [Текст] / П. К. Тетерин. — М.: Металлургия, 1983. — 270 с.
80. Рубцов В.Ю. Применение переменной скорости вращения валков в поперечно-винтовой прокатке с целью повышения их ресурса / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* - 2017. - № 11 (1415). - С. 72-77.
81. Рубцов В.Ю. Возможность использования ассиметричных валков шаропрокатных станов для получения устойчивого режима прокатки / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // В сборнике: НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО: Опыт и перспективы развития материалы XIV Международной научно-технической конференции: в 2 т.. Министерство образования и науки РФ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагильский технологический институт (филиал) ; Ответственные редакторы: М. В. Миронова, А. А. Пыстогов. - 2018. - С. 106-112. 166
82. Рубцов В.Ю. Разработка новых калибровок шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимися параметрами / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко //

- Промышленное производство и металлургия: мат-лы международной науч.-техн. конф. (18–19 июня 2020 г.) ; Мин-во науки и высш. обр. РФ, УрФУ им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 247-253. 94. Rubcov V.Yu Development of new roll pass designs for ball-rolling rolls with continuously variable parameters / V.Yu. Rubcov, O.I. Shevchenko // IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering. Vol 966 – 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy. – 2020. – №1. – pp. 012070.
83. Валок для поперечно-винтовой прокатки коротких тел вращения : Авторское свидетельство SU 573238 A1 : МПК51 В21Н 1/14 / И.А. Горб, Н.Ф. Грицук, Н.Ю. Вавилов, Е.Г. Казначеев, А.Н. Клименко ; заявитель и патентообладатель Украинский научно-исследовательский институт металлов - Заявка № 2338365 от 23.03.1976. ; опубл. 25.09.1977, Бюл.№35. – 3 с.
84. Рубцов В.Ю. Изготовление шаропрокатных валков с переменной глубиной впадины / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2019. - №14. – С. 16-24.
85. Валок для поперечно-винтовой прокатки малогабаритных изделий Авторское свидетельство SU 162801 A1:МПК51 В21Н / М.И. Глазер, А.Я. Буртов - Заявка № 698904/22 от 21.02.1961. ; опубл. 27.05.1964. Бюл.№11. – 2 с.
86. Способ прокатки шаров и валки для его осуществления Авторское свидетельство SU 806213 A1 A1 : МПК51 В21Н 1/14 / Ю.Н. Таран, Т.М. Миронова, М.М. Рябчий, Б.С. Полатовский, В.М. Снаговский, И.К. Шафран, А.П. Сичевой, М.М. Гелерман, А.В. Печерица ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени металлургический институт - Заявка № 2658350 от 06.09.1978. опубл. 23.02.1981. Бюл.№7. – 3 с.
87. Инструмент для поперечно-винтовой прокатки тел вращения типа шариков Авторское свидетельство SU 1738449 A1 : МПК51 В21Н 1/14 / В.И. Котенок, А.П. Слободин, А.Г. Толщихин - Заявка № 4813756 от 11.04.1990. опубл. 07.06.1992. Бюл.№21. – 3 с.

88. Рубцов В.Ю. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2018. - № 8 (1424). - С. 58-63.
89. Корн Г., Корн Т. 2.4-5. Характеристическая квадратичная форма и характеристическое уравнение / Г. Корн, Т. Корн - Справочник по математике. - 4-е издание. - М: Наука, - 1978. - 64. с.
90. Рубцов В.Ю. Опыт применения кривых второго порядка при изготовлении шаропрокатных валков / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, В.В. Курочкин // Калибровочное бюро. – 2020. - №16. – С. 15-20.
91. Рубцов В.Ю. Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, Н.М. Загребайлов // Молодежь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.): в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – Т.1. – С. 18-23.
92. Rubtsov V.Yu. Modeling rolling of grinding balls in rolls with continuously changing pitch / V.Yu. Rubtsov, V.V. Kurochkin, O.Y., Shevchenko, // Chernye Metally. – 2020. - №6 (1062). – pp. 36-40.
93. Рубцов В.Ю. Критерии отделения перемычки при прокатке шаров / В.Ю. Рубцов, В.В. Курочкин, О.И. Шевченко // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. 168 Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2020. - Т.1. – С. 178-179.
94. Рубцов В.Ю. Критерии отделения перемычки при прокатке шаров / В.Ю. Рубцов, В.В. Курочкин, О.И. Шевченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2020. – Т.11. - №1. – С. 46-49.
95. Рубцов В.Ю. Калибровка шаропрокатных валков с дифференцированно-изменяющейся глубиной впадины / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Молодёжь и наука : материалы международной науч.-практ. конф. (24 мая 2019 г.): в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им.

- первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2019. – Т.1. – С. 21-24.
96. Информационные технологии и вычислительные системы: Обработка информации и анализ данных. Программная инженерия. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Ленанд, 2015.
97. Винстон, У. Бизнес-моделирование и анализ данных. Решение актуальных задач с помощью Microsoft Excel / У. Винстон. - СПб.: Питер, 2006.
98. Стан ЦКБММ 44 для прокатки шаров 40-80 Технический проект / М.: ЦНИИТМАШ, 1955. – 54 с.
99. Стан ЦКБММ 45 для прокатки шаров 80-125 Технический проект / М.: ЦНИИТМАШ, 1955. – 58 с.
100. Рубцов В.Ю. Анализ и улучшение условий захвата заготовки в шаропрокатных станах / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, А.Н. Бородин // Молодёжь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. 169 Старшеклассников, студентов и аспирантов (29 мая 2020 г.) ; М-во науки и высшего образования РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 130-133.
101. Рубцов В.Ю. Освоение прокатки шаров на стане 60-120 АО «ЕВРАЗ НТМК»/ В.Ю. Рубцов, А.Н. Бородин, К.А. Улегин, К.Н. Шведов // Сталь. – 2020. - №6. – С. 32-35.
102. Wang Influence of cooling condition of tools on central deformation of workpiece and tool wear in cross wedge rolling / Wang [and etc.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – vol. 59. No. – 5. - pp 473-482.
103. Pater Z. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls/ Z. Pater [and etc.] //International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013. - Т67. - pp. 1-7.

104. Дубинский Ф.С. Методы проектирования температурных режимов горячей сортовой прокатки: учебное пособие/ Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 18 с.
105. Рубцов В.Ю. Распределение температурных полей и удельных обжатию при прокатке мелющих шаров / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, В.В. Курочкин, А.С. Опарин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2019. – Т. 75. - № 7. - С. 834-839.
106. Walters, J., Wu, W.T., Arvind, A., Li, G., Lambert, D. and Tang, J., 2000. Recent development of process simulation for industrial applications. *Journal of materials processing technology*, 98(2), pp.205-211.
107. Скрипаленко, М. М. К вопросу выбора программных продуктов для моделирования процессов обработки металлов давлением / М.М. Скрипаленко, М.Н. Скрипаленко // *Металлург*. – 2013. – № 1. – С. 20–23.
108. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н. и др. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырехвалковом стане винтовой прокатки // *Металлург*. 2017. № 9. С. 19-24
109. Jamal F, Rath S, Acherjee B. Process modelling of flat rolling of steel // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2019. -№5(1). –С. 104-113.
110. Воронцов, С. А., И. Ж. Харисов, Ю. А. Гладков. Применение программы моделирования QForm на кузнечном заводе ПАО "КАМАЗ". // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2016. №12. – С. 40-44.
111. Sugimoto T., Ju D. Y. Influence of Thermal Boundary Conditions on the Results of Heat Treatment Simulation // *MATERIALS TRANSACTIONS*. – 2018. – Т. 59. – №. 6. – С. 950-956.
112. Draganov I., Gospodinov D. Experimental data and simulation by the finite element method of the cylindrical steel shaft quenching in water // *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. – 2018. – Т. 4. – №. 3. – С. 96-98.

113. Birkhofer H., Lübben T., Taylor B. Optimizing Mandrel Dimensions for a Fixture Hardening Process of High-Strength Steel Aerospace Parts by Finite Element Simulation //Metals. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 303.
114. Krot, P. V., Bobyr, S. V. and Dedik, M. A. Simulation of backup rolls quenching with experimental study of deep cryogenic treatment. Int. Journal of Microstructure and Materials Properties, 2017, Vol. 12, No. 3/4, pp 259-275.
115. Sugianto, A., Narazaki, M., Kogawara, M. and Shirayori, A. Numerical simulation and experimental verification of carburizing quenching process of SCr420H steel helical gear, Journal of Material Processing Technology, 2009, 209(7), pp 3597-3609.
116. Способ непрерывной прокатки партии заготовок типа шаров и стан для его осуществления Авторское свидетельство SU 782934 А1: МПК51 В21Н 1/14/ В.П. Барабашкин, Заявка № 2714311 от 18.01.1979. опубл. 30.11.1980. Бюл.№44. – 4 с. 170
117. Mittemeijer E. J. Steel Heat treating Fundamentals and Processes //ASM Handbook A. – 2013. – Т. 4. – 747 с.
118. Майсурадзе М. В., Юдин Ю. В., Рыжков М. А. Методика моделирования процесса охлаждения при термической обработке стальных изделий простой формы //Сталь. – 2013. – №. 10. – С. 90-94.
119. Liščić B., Filetin T. Measurement of quenching intensity, calculation of heat transfer coefficient and global database of liquid quenchants //Materials Engineering-Materiálové inžinierstvo (MEMI). – 2012. – Т. 19. – №. 2. – С. 52-63.
120. Chotěborský R., Linda M. Prediction Of Mechanical Properties Of Quench Hardening Steel //Scientia agriculturae bohémica. – 2015. – Т. 46. – №. 1. – С. 26-32.
121. Петраш Л. В. Закалочные среды //М.-Л.: Машгиз. – 1959. — 112 с.
122. Saunders N. et al. Using JMatPro to model materials properties and behavior //Jom. – 2003. – Т. 55. – №. 12. – С. 60-65.
123. Saunders N. et al. The calculation of TTT and CCT diagrams for general steels //JMatPro Software Literature. – 2004.
124. Guo Z. et al. Material properties for process simulation //Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Т. 499. – №. 1-2. – С. 7-13.

125. B. Liščić, H.M. Tensi, L.C.F. Canale, G.E. Totten (Eds.): Quenching Theory and Technology – 2 nd Ed., CRC Press, Taylor&Francis Group, 2010. — 691 с.
126. Bhadeshia H., Honeycombe R. Steels: microstructure and properties. – Butterworth-Heinemann, 2017. – 457 с.
127. DEFORM-3D® User's Manual. Scientific Forming Technologies Corporation.
128. Sente Software, “Tempered Hardness of Martensitic Steels”.
129. Рубцов В. Ю. Мелющие шары повышенной точности / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко, П. А. Алыпов, В. А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 86–96.
130. Экономов А.Н. Влияние изменения микроструктуры поликристаллических металлов на их акустические свойства: Дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.06. / Экономов Андрей Николаевич - Москва, 2002. - 146 с.
131. Юрьев А.Б. Освоение производства мелющих шаров диам. 30 мм с объемной твердостью не менее 60HRC / А.Б. Юрьев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. – 2014. - №6. – С. 42-43.
132. Лановенко Е.В. Исследование акустических свойств металлов и сплавов в области фазовых переходов: Дис. канд. техн наук 05.02.01 / Лановенко Елена Викторовна - Комсомольск-на-Амуре, 2000 – 159 с. 127. Рубцов В.Ю. Экспресс-контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Молодёжь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. (26 мая 2017 г., г. Нижний Тагил) в 2 т. Т. 1 / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ. – 2017. – Т.1. – С. 20-26.
133. Рубцов В.Ю. Экспресс контроль качества термической обработки при производстве мелющих шаров / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин//Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV Уральская школа металловедов-термистов (19-23 марта 2018 года, Магнитогорск) / отв. ред. М.В. Чукин, А.Н. Емелюшин. – 171

- Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018. – С.61-62.
134. Аникин А.В. Разработка и внедрение непрерывной технологии и исследование оборудования для производства мелющих шаров высокой твердости / А.В. Аникин, П.Н. Тугушев, С.А. Кузнецов // неделя металлов в Москве, 11-14 ноября 2014 г.: Сборник трудов конференции. – М., 2015. – С. 338-348.
135. Ефременко В.Г. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра / В.Г. Ефременко [и др.] // Metallurg. – 2013. - №9. – 88-92.
136. Шевченко О.И. Исследование разрушения шаропрокатных валков в процессе эксплуатации /В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко, А.С. Спирина, Н.А. Панькова//Промышленное производство и металлургия: мат-лы международной науч.-техн. конф. (18–19 июня 2020 г.); Мин-во науки и высш. обр. РФ, УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 310-315.
137. ТИ 102-П-300-2019. Производство мелющих шаров на участке ШПС РБЦ. АО «ЕВРАЗ-НТМК» Технологическая инструкция. / Нижний Тагил. – 2019. – 51 с.
138. Быков П.О. Исследование и апробация технологии получения катаных помольных шаров 5 группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг» / П.О. Быков, А.Д. Касимгазинов // Наука и техника Казахстана.- 2018. - №1. – 31-40.
139. Жунусов А.К. Совершенствование технологии производства стальных помольных шаров V группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг» / А.К. Жунусов, П.О. Быков, А.Д. Касимгазинов, Токтар Даурен // Наука и техника Казахстана.- 2019. - №3. – 115-121.
140. Жунусов А.К. Влияние хрома на твердость помольных шаров 5 группы твердости, произведенных в условиях ПФ ТОО «Кастинг» / А.К. Жунусов, П.О. Быков, А.Д. Касимгазинов, Токтар Даурен // Наука и техника Казахстана.- 2019. - №3. – С. 122-128.

141. Смирнов Е.Н. Оценка применимости непрерывнолитой стали марки 55 при производстве мелющих шаров диаметром 40 мм групп твердости IV и V / Е.Н. Смирнов, А.Н. Смирнов, В.В. Михеев, В.А. Скляр, В.А. Белевитин, А.П. Верзилов, Г.А. Орлов // Сталь. - 2020. - № 4. - С. 44-49. 133. Lam M.M. Production of Hard (Class V) Grinding Balls at PAODMPZ / M.M. Lam , A.I. Serov , E.N. Smirnov et al. // Steel in Translation. - 2017. -Vol. 47. - № 5. - P. 325-329.
142. Рубцов В.Ю. Освоение производства мелющих шаров 5 группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018. - Т.1. – С. 117-118.
143. Юрьев А.Б. Освоение производства мелющих шаров особо высокой твердости диаметром 80-100 мм / А.Б. Юрьев [и др.] // Сталь. – 2010. – №4. – С. 90-91.
144. Улегин К.А. Новый шаропрокатный стан ЕВРАЗ НТМК – новые возможности для потребителей / К.А. Улегин, К.Н. Шведов, А.Н. Бородин, В.Ю. Рубцов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2020. – Т. 76. - № 6. - С. 602-608.
145. Шевченко О.И. Термическая обработка мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, В.Ю. Рубцов, В.В. Курочкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2019. – Т.21. - №3. – С. 110-117.
146. Курочкин В.В. Освоение технологии термообработки шаров в условиях нового шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» / В.В. Курочкин, О.И. Шевченко // Молодёжь и наука : материалы международной науч.- практ. конф. (24 мая 2019 г.): в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2019. – Т.1. – С. 24-27.
147. 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; 0,38 п.л. / 0,09 п.л.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Использование результатов диссертационной работы в условиях Производства

ЕВРАЗ
НТМК

АО «ЕВРАЗ НТМК»

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор ЕВРАЗ НТМК

Д.А. Кошкаров

2022



Акт

О результатах использования
«Методики определения рациональных настроечных параметров
шаропрокатного стана»

☐ августа 2022 г.

При настройке шаропрокатных валков для прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм, 120 мм шаропрокатного стана рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» была использована «Методика определения рациональных настроечных параметров шаропрокатного стана» авторов: Д.Л. Шварц, **И.К. Галимьянов**, В.Ю. Рубцов. После настройки стана с использованием методики определения рациональных настроечных параметров оперативно достигнут стабильный процесс прокатки с получением шаров требуемых геометрических размеров и качества поверхности.

Предложенную методику определения возможно использовать при настройке валков (в том числе после переточек) для производства мелющих шаров диаметром от 60 мм до 120 мм, что существенно уменьшит время на настройку стана и может использоваться для производства мелющих шаров промежуточных диаметров.

Начальник прокатного производства

К.А. Улегин

Начальник технического управления

К.Н. Шведов

Начальник РБЦ

Д.В. Гаёв

Заместитель начальника РБЦ
по технологии

С.А. Рощупкин

УТВЕРЖДАЮ
 Технический директор ЕВРАЗ НТМК


 Д.А. Кошкарров
 «30» 2022
Акт
 О результатах использования
 технологии производства мелющих шаров повышенной прочности

«30» августа 2022 г.

При производстве мелющих шаров диаметром 100 мм, 120 мм шаропрокатного стана рельсобалочном цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» была использована технология производства мелющих шаров повышенной прочности из марок стали 70ХГ, 65Г2С, 60ГР авторов: К.Н.Шведов, **И.К. Галимьянов**, М.А.Казаковцев. Разработана опытно-промышленная программа № ОПР19/0006. Применялось компьютерное моделирование процесса термической обработки в программном комплексе Deform 3D По результатам ОПР получены опытные партии шаров 5 группы твердости в соответствии с требованиями ГОСТ 7524-2015.

Предложенную разработанную модель можно использовать для производства мелющих шаров повышенной прочности.

Начальник прокатного производства

К.А. Улегин

Начальник технического управления

К.Н. Шведов

Начальник РБЦ

Д.В. Гаёв

Заместитель начальника РБЦ
по технологии

С.А. Рощупкин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2785665

Способ производства мелющих шаров из стали

Патентообладатель: *Акционерное общество "ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат" (АО "ЕВРАЗ НТМК") (RU)*

Авторы: *Шведов Константин Николаевич (RU), Казаковцев Михаил Андреевич (RU), Рубцов Виталий Юрьевич (RU), Галимьянов Ильяс Каримович (RU), Щелоков Михаил Николаевич (RU), Соколов Константин Евгеньевич (RU), Шкабара Андрей Викторович (RU)*

Заявка № 2022103210

Приоритет изобретения 09 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 12 декабря 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 февраля 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e4010a94ecbd24145d5c7
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

