

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

Рубцов Виталий Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ  
ПРОКАТКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Шевченко Олег Игоревич

Екатеринбург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	12
1.1. Современное состояние технологии и теории получения периодических профилей методом поперечно-винтовой прокатки (ПВП).....	12
1.2. Станы поперечно-винтовой прокатки, сортамент. Требования нормативной документации.....	24
1.3. Способы изготовления шаропрокатных валков.....	29
1.4. Выводы. Постановка цели и задач диссертационной работы.....	34
2. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ И ПРИВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ.....	36
2.1. Исследование причин разрушения и износа привалковой арматуры и шаропрокатных валков в условиях существующих калибровок.....	36
2.2. Увеличение стойкости валков за счет применения переменной частоты вращения.....	54
2.3. Способ повышения ресурса проводок за счет возможности увеличения подрезки.....	69
2.4. Выводы.....	72
3. РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ШАРОПРОКАТНЫХ СТАНОВ.....	75
3.1. Непрерывно изменяющиеся параметры в калибровках шаропрокатных валков.....	75
3.2. Определение функций непрерывно изменяющегося шага для шаропрокатных валков.....	79
3.3. Использование непрерывно-изменяющейся величины развалки калибра для построения модели шаропрокатного вала.....	84
3.4. Исследование режимов прокатки по опытной калибровке.....	90

3.5. Моделирование прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимся шагом.....	96
3.6. Модель расчета калибровки валков с переменной глубиной впадины.....	105
3.7. Выводы.....	111
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И НАСТРОЙКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ.....	114
4.1. Перспективы автоматизации режима прокатки шаров.....	114
4.2. Исследование и совершенствование процесса задачи заготовки в стан.....	119
4.3. Оценка контактных давлений .....	122
4.4. Получение шаров повышенной точности.....	129
4.5. Экспресс - контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров.....	136
4.6. Совершенствование производства шаров 5 группы.....	142
4.7. Выводы.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Использование результатов диссертационной работы в условиях производства.....	184

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Согласно приоритетным направлениям развития черной и цветной металлургии, из распоряжения Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р «Об утверждении Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности РФ до 2024 г. и на период до 2035 г», в ближайшие годы в металлургической и горнорудной промышленности России планируется их значительный рост. При переработке руды одним из основных этапов является процесс измельчения в стержневых и шаровых мельницах. В связи с этим, расширяется объем производства мелющих шаров, которые используются как основной рабочий элемент для помола руды. Существует множество способов производства шаров: литьё, штамповка, а также поперечно-винтовая или плоско-клиновая прокатка, последние два из которых наиболее производительны и в большинстве своем используются на объектах массового производства. За последние годы уже запустили в эксплуатацию шаропрокатные станы: «Северсталь» (Череповец), «KSP Steel» (Павлодар), «УГМК» (Сухой Лог), «ЕВРАЗ-НТМК» (Нижний Тагил). На сегодняшний день в мире установлено более 40 шаропрокатных станов для производства мелющих шаров. Большинство из шаропрокатных станов, находящихся на территории России и стран СНГ, были запущены еще в 60-е гг. XX века. Технологии получения шаров, применимые на данных станах, морально устарели, не отвечают современным требованиям и в большинстве своем требуют замены или модернизации оборудования.

Поэтому **актуальной** проблемой на сегодняшний день является совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки, а также калибровок шаропрокатных валков, технологии производства шаров на шаропрокатных станах для повышения: качества производимых шаров, увеличения энергоэффективности процессов, снижения трудовых ресурсов и минимизации человеческого фактора на процесс производства. Это требует

глубокого научного подхода, основанного на тенденциях современной науки и техники, включающего повышение технологичности производственного процесса, улучшение технических характеристик существующего оборудования и обоснование процессов, материалов, устройств и режимов предложенных вновь.

### **Степень разработанности темы исследования**

Развитие теории поперечно-винтовой прокатки коротких тел целиком основывается на работах А.И. Целикова и С.П. Грановского, заложивших фундаментальные основы расчетов для калибровок шаропрокатных валков, которые впоследствии усовершенствовались такими учеными, как В.И. Котенок, К.Л. Разумов-Раздолов, а также исследовались и были применены на практике группой ученых из Новокузнецка во главе с В.Н. Перетяtko, авторами из Люблинского технологического университета во главе с Z. Pater и специалистами из Китайской Народной Республики. Однако развитие науки и техники в других областях приводит к непрерывному совершенствованию современного прокатного и металлорежущего оборудования, способного производить изделия различной сложности и качества, к появлению новых систем управления, способных осуществлять более детальные настройки технологического процесса и к появлению полностью автоматизированных производственных линий непрерывного цикла, в связи с чем требуется совершенствование и адаптация под данные нововведения существующих теорий, конструкций, в том числе и калибровок валков, а также технологий производства шаров

Поэтому **целью** диссертационной работы является: разработка перспективных калибровок шаропрокатных валков, совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки и технологии производства мелющих шаров.

На основе анализа произведена декомпозиция цели на основные **задачи диссертационного исследования**, которые необходимо решить для ее достижения:

- повысить ресурс инструмента деформации шаропрокатных станов, в том числе, исследовать причины, виды износа, распределение износа по поверхности инструмента деформации;

- разработать перспективные калибровки шаропрокатных валков, аналитически описать кривые, являющиеся образующими для элементов калибровки. Детально рассмотреть каждый параметр калибровки (подъем и толщина реборды, шаг и развалка калибра), а также влияние данных параметров на режимы прокатки. Сравнить различные методы разработки калибровок и процессов прокатки, включая аналитический, опытный, а также моделирование МКЭ и доказать степень сходимости результатов для валков с непрерывно-изменяющимися параметрами;

- решить задачи прикладного характера по совершенствованию технологических режимов производства мелющих шаров (включающие создание процессов с максимальной автоматизацией, например, оперативный контроль оптимизации настроек стана или определение прокаливаемости шаров в On-line режиме для управления параметрами термообработки и пр.) и совершенствовать технологии производства (включая уменьшение расхода металла, повышение качества продукции как по геометрическим параметрам, так и по объемной твердости и др.)

**Научная новизна** диссертационной работы. В результате систематических исследований показаны направления развития, при которых возможно получение мелющих шаров высокого качества.

Установлено, что на шаропрокатных валках наиболее подвержены износу две области – зона захвата заготовки и зона отделения перемычки, в которых износ достигает предельных значений. Нагрузки на оборудование зависят от степени износа. Период приработки составляет 1/4 ресурса валка и сопровождается снижением нагрузки. Дальнейший износ приводит к замедленному, а затем к интенсивному росту нагрузки. Показано, что максимальное влияние частоты вращения валков на контактное давление происходит в момент захвата заготовки.

Аналитически получены функции значений непрерывно-изменяющихся параметров (изменения шага и развалки калибра) для шаропрокатных валков при выполнении условия сохранения постоянства секундных объемов; определено, что функциональные зависимости являются характеристическими уравнениями кривых 2-ого порядка. Это позволяет однозначно определить положение образующей кривой по 5 точкам. На этой основе разработана методика проектирования шаропрокатных валков.

Впервые произведено моделирование прокатки шаров в программе Deform-3D с использованием валков с непрерывно-изменяющимися параметрами. Доказана возможность использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимися параметрами с высокой степенью достоверности результатов моделирования по геометрическим и энергосиловым параметрам.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертации**

Проведенные исследования явились научным обоснованием рекомендаций.

Предложены скоростные режимы прокатки с автоматически-изменяемой частотой вращения в момент захвата заготовки для увеличения ресурса шаропрокатных валков, определены их рациональные параметры. При производстве шаров различных диаметров определены допустимые максимальные частоты вращения валков, например, для шаров Ø60 мм она составит 71 об/мин и, для Ø80 мм — 72 об/мин и т.д.

Установлено влияние конструктивных элементов проводок на их износ. Увеличение ширины рабочей части проводок, при прокатке шаров условным диаметром Ø60 мм, Ø80 мм, Ø100 мм, Ø120 мм, до максимально возможных значений 9,5 мм, 14,5 мм, 16,5 мм и 27 мм, соответственно, повысило их ресурс.

Впервые разработаны модели энергоэффективных калибровок для валков с переменными параметрами (непрерывно-изменяющимся шагом по

функциональным зависимостям, переменной глубиной впадины), которые обеспечивают постоянное прилегание заготовки к валкам и создают более равномерное распределение контактных давлений по поверхности шара.

На основании экспериментов решен ряд прикладных задач, направленных на совершенствование технологии производства мелющих шаров: уменьшена концевая обрезь заготовки; предложено разбиение мелющих шаров на две категории точности: обыкновенной и повышенной; предложен экспресс контроль глубины прокаливания мелющих шаров на основании регистрации акустических колебаний; разработаны режимы, гарантирующие получение шаров 5 группы твердости из сталей марок 70ХГФН-2, 75ХГФН и Ш-3Г в условиях закалки с прокатного нагрева.

#### **Методология и методы исследования:**

Исследования режимов прокатки и термообработки мелющих шаров проводились в рамках производственного эксперимента на станах 40-80 и 80-125, а также в условиях вводимого в эксплуатацию стана 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК»;

Проектирование 3-D моделей шаропрокатных валков производилось в программе SolidWorks 2018 Professional, а моделирование процессов прокатки методом конечных элементов проводилось в программном комплексе Deform 2D/3D. Математическое моделирование процессов термической обработки проводилось в программе Solid Flow Simulation.

Определение геометрических параметров проводилось как на стандартном оборудовании, так и при помощи специальных пространственных измерителей («FARO ARM» и 3-D сканер) с применением методов допускового контроля и учетом погрешностей инструментов и методов измерения. Контроль физических величин режимов работы производился на метрологически-аттестованном оборудовании с использованием систем автоматизации, измерительных инструментов и стационарных приборов (тепловизора «Fluke Ti 400», твердомера

«МЕТОЛАБ 703», ударного копра, металлографического микроскопа «Leica MEF4A» и т.д.).

**Положения выносимые на защиту:**

- результаты комплексных исследований режимов поперечно-винтовой прокатки, обеспечивающие получение мелющих шаров высокого качества;
- характер, степень и распределение износа по длине шаропрокатных валков. Влияние конструктивных элементов проводок на их износ;
- скоростные режимы прокатки с автоматически-изменяемой частотой вращения в момент захвата заготовки;
- новые калибровки шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимися параметрами (с непрерывно изменяющимся шагом и постоянной или линейно-увеличивающейся толщиной реборды, а также с переменной глубиной впадины);
- 3-D модель процесса прокатки в программе Deform-3D, использующая валки с непрерывно-изменяющимися параметрами, показавшая высокую степень сходимости результатов моделирования по геометрическим и энергосиловым параметрам с результатами промышленного эксперимента;
- прикладные исследования по совершенствованию технологических режимов производства мелющих шаров: оперативный контроль оптимизации настроек стана, определение прокаливаемости шаров в On-line режиме и совершенствование технологии производства: уменьшение расхода металла, повышение качества мелющих шаров;
- результаты производственного эксперимента, обеспечивающие получение шаров 5 группы твердости в условиях шаропрокатного стана 60-120.

Достоверность **основных положений и выводов диссертационной работы** обеспечена корректным выбором современных методов исследования и согласием базовых положений диссертации с современными концепциями.

Достоверность математического моделирования определяется применением современных методов моделирования процессов прокатки, термообработки и высокой степенью сходимости результатов моделирования с опытными данными.

Предложенные и разработанные в диссертационной работе методы и методики были использованы на промышленных площадках:

- Внедрение мероприятия по переменной частоте вращения валков на стане 80-125 крупносортного цеха АО «ЕВРАЗ-НТМК» и фактическое увеличение за 2019 год ресурса валков до 1960 тонн с одной переточки вместо 1800 т за 2018 год (Приложение 2 Акт соответствия и акт использования изобретения 2723342 от 07.08.2020);

- Получена высокая точность геометрии шаров и энергоэффективность прокатки по калибровке с непрерывно-изменяющимся шагом и постоянной шириной реборды, на основании чего определено дальнейшее преимущество: (а) в использовании непрерывно-меняющегося шага с использованием функции сохранения постоянства объема, (б) изготовления шаропрокатных валков на фрезерном 5-координатном обрабатывающем центре с обеспечением непрерывно-меняющегося шага, взамен токарно-винторезных станков (приложение 2 Акт о результатах опытной прокатки от 30.04.2018г.)

- Произведено максимально-возможное увеличение ширины проводки для всех используемых профилей на шаропрокатных станах АО «ЕВРАЗ-НТМК», что дало увеличение производства ШПС за счет снижения плановых простоев по замене проводок с суммарным экономическим эффектом за 2019 год в размере 10,82 млн. рублей (Приложение п.№2. Акта О результатах внедрения инициатив на участке ШПС от 23.09.2020г.);

- Разработаны режимы настройки стана, повлиявшие на увеличение стойкости валков и увеличение производства ШПС с суммарным экономическим эффектом за 2019 год в размере 22,33 млн. рублей (7,2 млн. рублей за счет эффекта от сокращения используемых валков; 15,13 млн. руб.

за счет эффекта от увеличения производства ШПС) (Приложение п.№2. Акта О результатах внедрения инициатив на участке ШПС);

- Получены устойчивые процессы изготовления мелющих шаров 5 группы твердости из марок стали: 70ХГФН-2 и 77ХГФНМ.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (75, 76, 78) МГТУ им. Г.И. Носова: - г. Магнитогорск 2017, 2018, 2020; Международных научно-практических конференциях «Молодежь и наука» НТИ(ф) УрФУ им. Б.Н. Ельцина: - г. Нижний Тагил 2017, 2018, 2019, 2020; XIV Международной научно-технической конференции «Наука–образование–производство: Опыт и перспективы развития» - г. Нижний Тагил 2018; XXIV, XXV Уральских школах металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» - Магнитогорск (2018), Екатеринбург (2020); 4-ой научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении ИТММ» - г. Пермь 2019; XII Международном конгрессе прокатчиков - Вькса (2019); Международной конференции «Промышленное производство и металлургия (ICIMM)» – Нижний Тагил 2020.

По результатам диссертационной работы опубликованы 30 статей, среди которых 4 статьи вошли в базу данных SCOPUS, еще 5 статей вошли в рецензируемые научные издания, определенные ВАК и Аттестационным советом УрФУ, а также, получен патент РФ на изобретение.

## 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

### 1.1. Современное состояние технологии и теории получения периодических профилей методом поперечно-винтовой прокатки (ПВП)

Для получения готовых периодических профилей широко применяется поперечная прокатка. Два наиболее производительных способа, являющихся разновидностями поперечной прокатки: поперечно-винтовая (рисунок 1 а.) и поперечно-клиновая прокатка (рисунок 1. б). Данные способы прокатки являются наиболее сложными процессами среди всех существующих процессов прокатки, поэтому применяются достаточно редко. Третий наиболее распространенный способ изготовления периодических профилей, получивший широкое распространение в последние годы – это плоско-клиновая прокатка.

Среди этих способов наиболее производительным считается плоско-клиновая прокатка, однако в России и странах бывшего СНГ находится множество шаропрокатных станов поперечно-винтовой прокатки по производству шаров, при этом также некоторые предприятия строят новые станы аналогичной конструкции, имеющие некоторые преимущества перед станами плоско-клиновой прокатки, поэтому их совершенствование на сегодняшний день является актуальной задачей.

Поперечно-винтовая прокатка является разновидностью процесса обработки металлов давлением, где формирование металла происходит между вращающимися в одном направлении валками, при этом круглая заготовка вращается противоположно валкам и одновременно перемещается вдоль своей оси, в комплексе представляя собой винтовое движение (рисунок 1.а.) [1]. Также существуют примеры прокатки периодических профилей, в том числе шаров, нетрадиционными способами, с совмещением нескольких видов ОМД для получения готового профиля [2-11].

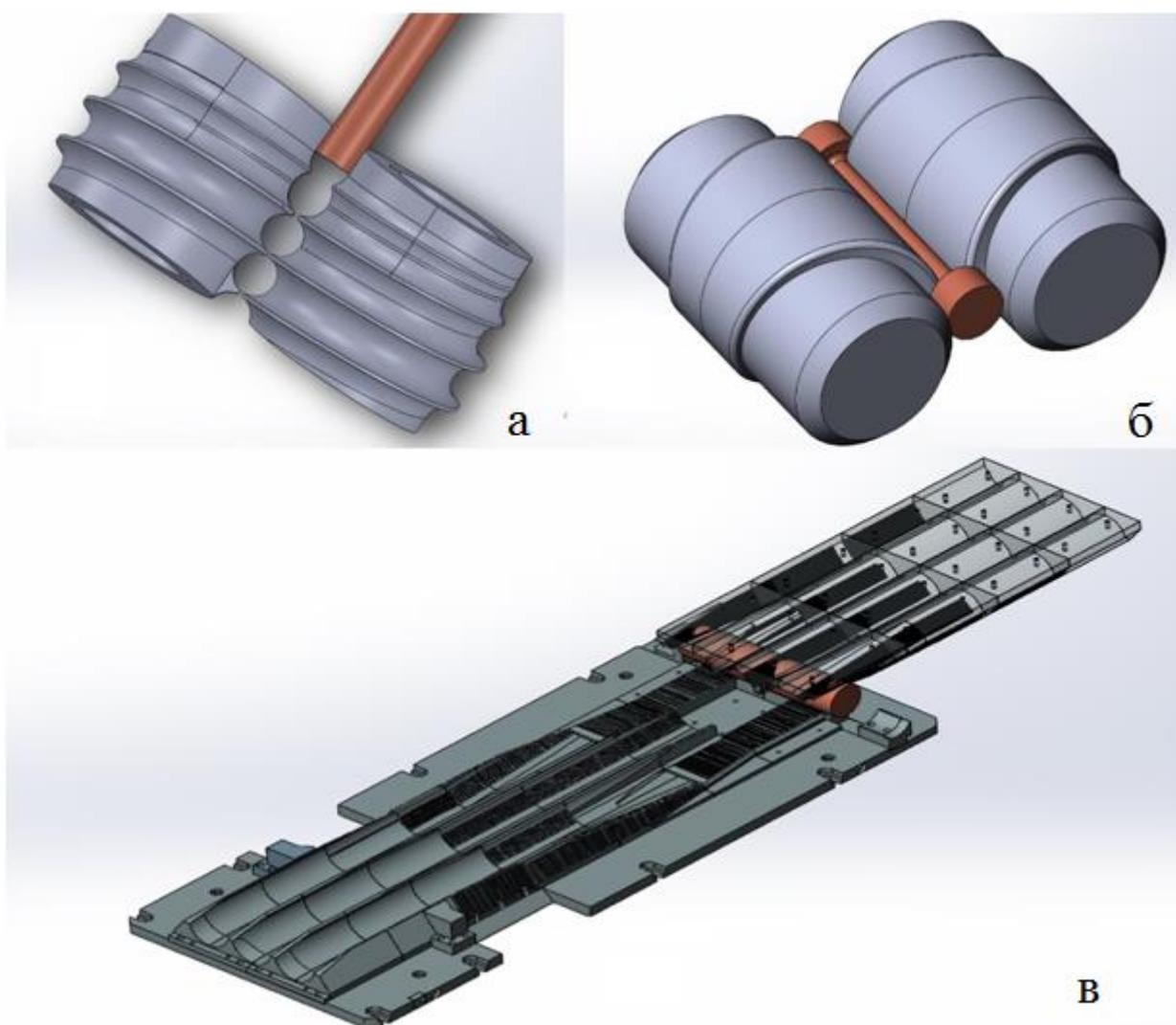


Рисунок 1. Процессы прокатки для получения периодических профилей  
 а. - поперечно-винтовая прокатка, б. - поперечно-клиноватая прокатка, в. - плоско-клиноватая прокатка

Впервые концептуальная модель валков была разработана и запатентована в Германии в 1888 [12], где поверхность валков представляла выполнение винтовых калибров на гиперboloиде, 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 была в 1925 году [13], когда американский изобретатель Ходж подал заявку на патент «Машина для прокатки шаров». Принципиальное конструктивное отличие заключалось в том, что валки имели уже цилиндрическую форму с незначительной конусностью угла подъема реборды. В этом патенте подробно описана

принципиальная конструкция прокатной клетки с механизмами проводок и устройствами углового и осевого смещения валков. В 1934 году другой американский изобретатель П. Кламп предложил стан данного типа использовать для изготовления коротких тел вращения, представив идею в виде патента «Стан для прокатки изделий круглого сечения и неправильного профиля» [14]. В дальнейшем для получения изделий методом поперечно-винтовой прокатки, где длины заготовки значительно превышают диаметр, изобретателями из Японии были разработаны и получены патенты на конструкцию валков, обеспечивающих получение данных изделий [15,16]. Впервые практическое применение вышеупомянутых технологий, а также их научное обоснование, было проведено в СССР командой исследователей ВНИИМЕТМАШ под руководством академика А.И. Целикова [17,18] в 1940-х - 1950-х годах. В 1951 году был запущен первый промышленный стан производства заготовок подшипниковых шаров 25-50 мм, разработки ВНИИМЕТМАШ, в 1-ом ГПЗ в городе Москва, а в 1954 году, первый стан для производства мелющих шаров 25-50 на Калининском заводе имени 1-ого мая, в городе Тверь. Уже в 1960-е годы были разработаны и запущены станы для производства заготовок для машиностроения по форме и размерам очень близкие к готовому изделию [19-21]

В последующем, с изменением рынка и отсутствием массовой потребности в однотипных заготовках, шаропрокатные станы стали ограничены только для производства мелющих шаров, а также шаров и колец для подшипников качения.

Теоретические основы, предложенные А.И. Целиковым, использовались для разработки калибровок, используемых на станах поперечно-винтовой прокатки. В последующие годы методики расчета калибровок валков претерпели незначительные изменения. С появлением металлорежущего оборудования имеющего возможность производить нарезку винтовой линии переменного параметра (токарные копировальные полуавтоматы, 4-х и 5-и координатные обрабатывающие центры), стали

разрабатываться и применяться калибровки шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом [22-25], вместо используемых до этого калибровок с дискретно-изменяющимся шагом.

С развитием вычислительной техники и появлением программных сред моделирования процессов ОМД, исследования стали развиваться значительно интенсивнее и с началом XXI века появляется множество теоретических исследований процессов поперечно-винтовой прокатки, основанных на МКЭ. Существуют некоторые исследования, проведённые в России [26-28], но большинство исследований, основанных на компьютерном моделировании процессов поперечно-винтовой прокатки (рисунок 1.а.), а также пришедшему ему на смену более прогрессивному методу плоско-клиновой прокатки (рисунок 1.в.), при производстве стальных мелющих шаров и прочих тел, производилось в Китайской Народной Республике (КНР) и Польше.

Проблема состоит в том, что винтовую прокатку стальных шаров трудно проанализировать теоретически из-за ее сложности. Прогресс в технологии производства шаров, прежде всего, основан на экспериментальных методах исследования, а исследования в области применения данного способа прокатки для производства изделий более сложной формы могут завести в тупик.

В Китайской Народной Республике, в отличие от России и прочих стран, с учетом масштаба внутреннего и внешнего рынка, возникает потребность в продуктах массового производства, поэтому за последние два десятилетия, заимствуя знания о процессах поперечно-винтовой прокатки, было освоено и получено множество продуктов различных форм, представленных на рисунке 2. Кроме шаров различных диаметров были получены ролики, короткие ступенчатые валы, шпильки и множество других продуктов [29-31]. Первые математические модели, основанные на проектировании с использованием метода конечных элементов, представлены в следующих работах [32-33].



Рисунок 2. Сортамент, получаемый поперечно-винтовой прокаткой [29]

В статье [34] впервые на полученной модели было показано, что в процессе захвата металл разделяется ребордой, и часть его уходит в заготовку, что приводит к неполному заполнению калибра. Это исследование доказывает необходимость развалки калибра в начальных заходах для его дальнейшего полного заполнения. Под развалкой калибра здесь понимается подрезка реборды по ширине с целью увеличения внутреннего пространства калибра.

Необходимость развалки калибров была установлена еще А.И. Целиковым и сформулирована как условие постоянного прилегания металла к реборде вала [18], но не имела прямых доказательств. В вышеприведенной статье [34] было показано распределение течения металла в процессе поперечно-винтовой прокатки и возникновение растягивающих напряжений.

В связи с вышесказанным, растягивающие напряжения создаются 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» [35]. Данный феномен был назван в честь братьев Маннесманов, разработавших в

1885 году валковый прошивной стан, что является зарождением поперечно-винтовой прокатки [36]. В отличие от прокатки труб, где образование пустот и, как следствие, сплошных отверстий в заготовке - основное условие процесса, при прокатке шаров их образование является нежелательным эффектом и иногда приводит к недопустимым дефектам.

В большинстве своем устранение данных дефектов происходит при помощи изменения калибровки валков, режимов прокатки (включая скорость и температуру прокатываемого металла). В статье [37] описано, что расход металла достигает 23% в большей степени по причине образования шаров с внутренними пустотами. Для уменьшения расхода металла авторы не ограничивают процесс прокатки и допускают получение шаров с пустотами, но в дальнейшем данные шары подвергают прессованию, что позволяет практически полностью исключить пустоты. Размеры деформированных шаров при этом не превышают допустимых отклонений и укладываются в стандарт.

Проведенные авторами из КНР исследования в области поперечно-винтовой и поперечно-клиновой прокатки, в той или иной мере были реализованы и внедрены на производственных площадках.

Основная часть исследований группы авторов из Польши заключается в моделировании процессов при помощи программного обеспечения методом конечных элементов. Ими был предложен способ прокатки шаров из головок рельсов [38]. Данные ученые занимались моделированием процессов поперечно-винтовой прокатки деталей нетрадиционной формы, образованных осесимметричным профилем, пользующихся массовым спросом (аналогично проведенным ранее советским исследованиям [19-21] и китайским исследованиям [29-31]), например, фрезерных головок, ступенчатых роликов дюбелей с шарообразной головкой [39-40] и шипов [41-42], назвав данный процесс клиновинтовой прокаткой “Helical wedge rolling process”. Также был предложен способ производства резьбовых винтов как трёхвалковой поперечно-винтовой, так и плоско-клиновой прокаткой, с

приведением результатов опытно-промышленных испытаний при производстве винтов для крепления шпал  $\text{Ø}22$  мм на промышленном стенде [43].

Одно из первых исследований, проведенных с получением ими опытной партии шаров, было проведено в 2013 году при производстве шаров  $\text{Ø}30$  мм на валках поперечно-винтовой прокатки [44]. Шары при этом имели значительные дефекты, включая неотделяемые перемычки в виде «гирлянд». Положительным эффектом в ходе этого испытания было то, что результаты моделирования (рисунок 3.а), включая наблюдаемые нагрузки, температуры и прочие параметры, а также дефекты, полученные на шарах со значительной степенью точности, сошлись с результатом, полученным опытной прокаткой (рисунок 3.б).

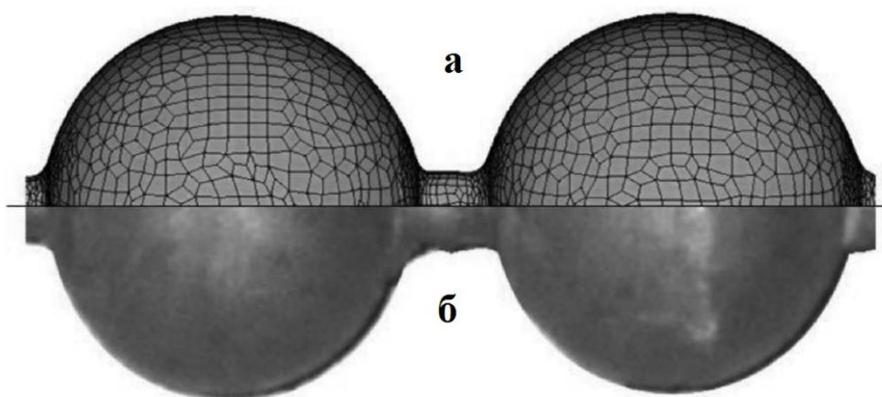


Рисунок 3. Сравнительный анализ результата моделирования и опыта [44]

Дальнейшие работы польских исследователей по прокатке шаров в большей мере проводились с использованием моделирования по методу конечных элементов.

Для процесса моделирования многозаходной поперечно-винтовой прокатки шаров (с 4-х заходными валками), которые используются для повышения производительности шаропрокатных станков, использовалось

программное обеспечение Simufact. Forming simulation v.12 [45]. Согласно приведенным к статье выводам:

1. производительность прокатки увеличивается пропорционально количеству примененных заходов;
2. во время прокатки, нагрузки и крутящий момент изменяются циклически в пределах  $\pm 6\%$  от их среднего значения, что происходит благодаря работе валка одновременно в нескольких калибрах и приводит к стабилизации процесса.

В следующем исследовании для анализа характера износа валков авторами использовалась программа Simufact Engineering, как результат соединения двух программных модулей: MSC.Super Form и MSC.Super Forge [46].

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. Металлообработка вызывает износ инструмента. Самый распространенный тип износа инструмента в процессах прокатки металла - абразивный износ. Износ инструмента при прокатке вызывает увеличение размеров готового продукта.

Выделены основные факторы износа.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на износ инструмента в процессах прокатки металла, является проскальзывание металла в валке. Скольжение на контактной поверхности металлорежущего инструмента происходит из-за разности скоростей по боковой стороне реборды, что влияет на процесс трения.

Также выявлено, что износ инструмента уменьшается с повышением температуры металла.

Первый и второй шаг винтового калибра от начала реборды чаще всего подвержен износу. Износ на первом обороте винтовой канавки валка является самым высоким, потому что в нем происходит глубокий врез в

заготовку, для обеспечения начала процесса прокатки. На третьем обороте вальца наблюдается наименьший износ, так как в данной области происходит окончательное формирование шара и износ распространяется по всей площади контакта равномерно.

Когда процесс происходит при самой низкой возможной температуре, около  $850^{\circ}\text{C}$ , повышенный износ наблюдается по всей длине инструмента. При максимальной температуре -  $1150^{\circ}\text{C}$ , наблюдаемый износ инструмента после прокатки заготовки в представленной модели значительно снизился и не превышает  $0,001\text{ мм}$ , при этом на первом шаге от зоны захвата на поверхности реборды также продолжает наблюдаться повышенный износ.

В следующей статье авторы изучают влияние параметров процесса (диаметра заготовки, температуры нагрева заготовки перед прокаткой) на качество получаемых шаров на примере получения шаров с условным диаметром  $40\text{ мм}$  [47]. В основных выводах данного исследования сообщается:

1. Диаметр заготовки оказывает наибольшее влияние на качество выпускаемых шаров. Следовательно, правильная калибровка позволяет прокатывать шарики требуемого качества из стальных прутков, изготовленных по обыкновенному классу точности. Однако процесс прокатки также сильно зависит от начальной температуры заготовки. При этом, температуру предварительного нагрева заготовки следует выбирать так, чтобы шары могли подвергаться термической обработке сразу после прокатки.

2. Самая высокая геометрическая точность шаров достигалась, когда шары прокатывались из заготовки диаметром  $40\text{ мм}$  (то есть диаметр заготовки был на  $3,5\%$  меньше диаметра шара);

3. Использование заготовки, диаметром на  $6\%$  меньше диаметра шара, приводит к недостаточному заполнению; тем не менее, достигнутая геометрическая точность прокатываемого изделия достаточна для использования его как мелющего тела;

4. Использование диаметра заготовки равного или большего диаметру получаемых шаров, вызывает переполнение и серьезные дефекты поверхности шаров;

5. Заготовка должна быть предварительно нагрета до минимально возможной температуры, чтобы можно было произвести термообработку шаров сразу после процесса прокатки;

6. Когда температура предварительного нагрева заготовки слишком высока, появляются проблемы с удалением перемычек от получаемых шаров, в связи с чем, они часто остаются на шарах;

7. Переполнение в результате слишком большого диаметра заготовки или применения низкой температуры предварительного нагрева приводит к внезапному увеличению силовых параметров, что уменьшает срок службы инструмента;

8. Значительная корреляция между экспериментальными данными и результатами моделирования конечных элементов доказывает, что программное моделирование может быть использовано для анализа сложных процессов обработки металлов.

В публикации [48] описываются различные конструкции шаропрокатных валков, преимущества и недостатки той или иной калибровки шаропрокатных валков.

Согласно заключению данного исследования:

1. Разработанная цифровая модель процесса поперечно-винтовой прокатки для изготовления шаров позволяет изучать изменение формы шара в процессе прокатки и грамотно моделировать операцию разделения шаров.

2. Рассчитанные силовые параметры (радиальная нагрузка и крутящий момент) показывают высокую степень согласия с экспериментальными данными.

3. Поперечно-винтовая прокатка может быть выполнена с использованием винтовых валков с разными формами и размерами реборд. Авторами представлены три варианта валков для прокатки шаров диаметром

125 мм без поверхностных дефектов и внутренних трещин. Принципиальные отличия данных валков заключаются в форме реборды заходной части валка.

4. Использование валков с клиновидными ребордами обеспечивает оптимальное заполнение, равномерную деформацию материала и стабильность силовых параметров в процессе прокатки. Использование валков с широкой ребордой на заходе позволяет получить устойчивый процесс захвата и минимальный износ на заходе, но при этом нагрузки, возникающие в процессе прокатки, значительно выше, чем в других разработанных моделях. Использование валков с узкой ребордой на захвате создает плавную врезку в металл и наименьшие нагрузки, но при этом создается их повышенный износ за счет малой площади контакта.

5. Также для каждого типа разработанных валков представлена аналитическая модель расчета их калибровок для последующего использования.

В целом, подводя итог обзора исследований, проведенных группой польских авторов из Люблинского технологического университета, следует отметить, что ими были исследованы методы прокатки периодических профилей. При этом практически все исследования заключались на принципе проектирования методом конечных элементов, что является ничем иным, как проверочным расчетом правильности калибровки валков с отсутствием теоретического обоснования оптимальности параметров калибровок. В отличие от советских и китайских, данные исследования и разработки не получили широкого промышленного применения и остановились на этапе опытных прокаток. При этом, стоит отметить особый вклад авторов в детальное исследование процессов поперечно-винтовой прокатки шаров, в котором были изучены не только процессы калибровки валков и расчет энергосиловых параметров, а также износ валков, его причины, влияние формы реборд, клиньев, элементов валков, температуры и диаметра заготовки на качество получаемых шаров и прочие условия процессов прокатки.

Кроме перечисленных выше исследований, охвативших процессы поперечно-винтовой прокатки периодических профилей, масштабные разработки в данной области отсутствуют. Из исследований последних лет стоит отметить моделирование прокатки шаров исследователями из Украины [49], где подробно рассмотрен процесс моделирования прокатки шаров на шаропрокатных станах [50].

Изучив существующую в настоящий момент картину по состоянию развития поперечно-винтовой прокатки, целью дальнейших исследований является научное обоснование применения тех или иных методов, составление теоретических основ для изготовления калибров различных форм, моделирование их, а также опытное подтверждение оптимальности создаваемых моделей.

Прежде аналитический расчет калибровок и усилий прокатки был использован только у А.И. Целикова [18], им были описаны методики получения конических, прямоугольных (цилиндрических) и круглых (сферических) профилей.

Среди методик калибровок, кроме оригинальной, предложенной А.И. Целиковым [18], существует переработанная методика калибровки шаров, представленная учеными из Новокузнецка [51-53]. Остальные методики, как калибровок, так и расчета усилий прокатки основаны либо на экспериментально-практических достижениях [54,55], либо на методе конечных элементов, с моделированием в программной среде [29-34, 38-49], не имея фундаментальной основы. В качестве приведенной модели расчета периодического профиля малой длины также появилась методика, представленная в работе [56].

Кроме вышесказанного, в ряде случаев были определены интенсивности напряжений и степени деформации как в абсолютных величинах [27], так и в относительных [57].

Одновременно с ростом номенклатур и разнообразия товаров, также появляются другие виды продукции, объем серийности которых растет и,

возможно, в будущем потребует применения более технологичных методов изготовления, среди которых поперечно-винтовая прокатка для стальных изделий может являться одним из лидеров. Это относится к деталям различных размеров от заклепок и метизов, до корпусных деталей с осевой симметрией [33]. В этом направлении была попытка создания модели расчета энергосиловых параметров и калибровки валков для производства осесимметричных профилей, образованных кривыми 2-ого порядка [58-59]. Также был предложен способ производства изделий нетрадиционной формы с использованием поперечно-винтовой прокатки на примере производства корпусов снарядов [60-61].

## **1.2.. Станы поперечно-винтовой прокатки, сортамент. Требования нормативной документации**

Прокатку сплошных изделий в винтовых калибрах разделяют на прокатку шаров (чечевиц) и прокатку цилиндров (осей, стержней) [62].

Стальные изделия диаметром до 12 мм прокатывают в холодном состоянии, а изделия большего диаметра – в горячем.

Цилиндрические изделия, как правило, изготавливают в однозаходных валках, а шары – в многозаходных. Число заходов валков при холодной прокатке шаров может достигать 20...24, а при горячей прокатке – 6.

Производительность оборудования определяется числом заходов винтового калибра и частотой вращения валков, которая в зависимости от требований к изделиям и прокатываемого материала составляет 50...200 об/мин, что и обуславливает высокую производительность процесса.

При горячей прокатке точность диаметральных размеров изделий составляет 0,2...1 мм, а при холодной она возрастает до 0,05...0,2 мм и зависит от точности диаметра прутка, жесткости рабочей клетки, точности валков, износа и настройки рабочего инструмента.

Производство шаров на комплексе ШПС осуществляется по следующей технологической схеме. Пакет заготовок укладывается на загрузочное устройство нагревательной печи. Заготовки поштучно помещаются в печь (газового или индукционного нагрева), откуда после нагрева до  $(1050-1100)\pm 25$  градусов Цельсия выгружаются внутривалковым рольгангом на транспортный рольганг шаропрокатного стана. Поданная к стану заготовка скатывается по решетке на передний стол входной стороны стана, по которому толкатель задает ее в валки рабочей клетки стана, где осуществляется прокатка шаров. Выходящие из рабочей клетки шары передаются на отводящий желоб, направляющий шары на участок термообработки шаров.

На участке термообработки шары охлаждаются на воздухе до температуры закалки на подстуживающем конвейере, а затем поступают в закалочный барабан, где они интенсивно охлаждаются подаваемой водой.

Закаленные шары, имеющие температуру самоотпуска, поступают в бункера или большие контейнеры, где происходит их самоотпуск (медленное охлаждение), в настоящее время на современных станах также иногда используют отпускные печи и установки охлаждения готового шара, что позволяет получить шар, прошедший полный цикл термообработки и отгружать готовую продукцию с технологической линии.

Новое поколение шаропрокатных станов отличается:

- разрезной барабанной конструкцией узла валков, что в отличие от цельного барабана позволяет повысить жесткость узла валков и изменять угол раскатки и два нажимных винта на каждом валке;
- откидывающейся крышкой рабочей клетки, что делает замену валков более быстрой;
- применением комбинированного главного редуктора взамен шестеренной клетки и редуктора, что снижает массу и стоимость стана;
- наличием червячных осевых механизмов для осевой настройки валков, что повышает их точность и надежность;

- жестким и регулируемым по высоте вводным желобом, который снабжен системой отсоса пыли и окалины, что снижает шум и уменьшает запыленность на рабочем месте.

Одной из основных задач является снижение энергосиловых параметров процесса прокатки, что обеспечивает:

- повышение точности и качества прокатываемых шаров;
- расширение сортамента прокатываемых шаров на новых и существующих станах без их реконструкции;
- увеличение производительности оборудования за счет повышения скорости прокатки и числа заходов валков;
- снижение капитальных (стоимость оборудования) и текущих (на инструмент, запасные части и наладочные и ремонтные работы) затрат за счет повышения стойкости валков и снижения рабочих нагрузок.

Шаропрокатный инструмент состоит из двух рабочих валков и двух рабочих линеек, спрофилированных в соответствии с диаметром прокатываемого шара.

Валки представляют собой полые бочки, на наружной поверхности которых нарезаны винтовые ручьи, имеющие переменные шаги, ширины и высоты реборд [22].

Бочки валков насаживаются на постоянные валы рабочей клетки стана.

Винтовые валки изготавливают из кованной стали 30ХГСА, 35ХГСА, 4Х5МФ1С, 5ХНМ. Термообработка - закалка на твердость 46-52 HRCэ. Желательно азотирование рабочей поверхности на глубину 0,1-0,15 мм. Твердость азотированного слоя > 60 HRCэ. Рабочие линейки представляют собой калиброванные пластины из стали 45, рабочая поверхность которых наплавлена износостойким сплавом. Для направления заготовки в валки в рабочей клетки устанавливаются вводные проводки, представляющие собой отрезки труб, приваренные к специальным стойкам. Диаметр отверстия трубы на 8-10% больше диаметра прокатываемого прутка.

Требования к мелющим шарам определяются по последней редакции ГОСТ 7524-2015 [63]. Основными показателями являются твердость шаров, представленная в таблице 1 и геометрические размеры и масса, представленные в таблице 2.

Таблица 1. Твердость шаров после термообработки

Условный диаметр шара, мм	Группа твердости шаров						
	1	2	3	4		5	
	Твердость HRC не менее						
	Поверхность шара			На глубине 0,5 радиуса шара		Поверхность шара	Объемная
От 15 до 45 включ.	45	49	55	55	45	61	57
От 50 до 70 включ.	43	48	53	53	43	60	53
От 80 до 100 включ.	39	42	52	52	40	58	48
От 110 до 120 включ.	35	38	50	50	35	56	43

Таблица 2. Предельные отклонения размеров, объем и масса шаров

Условный диаметр, мм	Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение по номинальному диаметру, мм	Расчетный номинальный объем, см <sup>3</sup>	Расчетная номинальная масса, кг
15	15,0		1.76	0.014
20	20.0 <sup>1</sup> (20.8 <sup>2</sup> )	±1,0	4.18 <sup>1</sup> (4.70 <sup>2</sup> )	0.033 <sup>1</sup> (0.037 <sup>2</sup> )
25	25.0 <sup>1</sup> (26.0 <sup>2</sup> )		8.18 <sup>1</sup> (9.20 <sup>2</sup> )	0.064 <sup>1</sup> (0.072 <sup>2</sup> )
30	31.5	±2,0	16.4	0.128
40	41.5		37.4	0.294
50	52.0	±3,0	74	0.58
60	62.0		125	0.98
70	73.0		204	1.60
80	83.0		299	2.35
90	94.0	±4,0	435	3.41
100	104.		589	4.62
110	114.0		776	6.09
120	125.0	±5,0	1023	8.03

Примечание:

- 1) 1 параметры для штампованных шаров;
- 2) 2 параметры для горячекатаных шаров;
- 3) объём и масса шара вычислены по номинальному диаметру при плотности стали 7,85 г/см<sup>3</sup>;
- 4) отклонения от геометрической формы шара не должны превышать предельных отклонений по номинальному диаметру;
- 5) на поверхности шаров не допускаются дефекты, выводящие размер за пределы допуска.

В настоящее время под понятием качества мелющих шаров подразумевается в большей степени группа твердости. Согласно ГОСТ 7524-2015 [63] количество групп твердости достигло 5, с появлением новых марок стали [64, 65], современных технологий термообработки и их контроля [66-74], оборудования [75-76] и возможности сквозного прокаливания. Однако значительные отклонения от номинального профиля на поверхности шаров после термообработки на высокую твердость создают напряжения и могут привести к образованию трещин или разрушению шаров.

Таким образом, требования к качеству мелющих шаров определяются группой твердости, а, соответственно, прокаливаемостью мелющих шаров, таким образом, это оказывает влияние на необходимость строгого соблюдения всех процессов термической обработки. Требования к современным шаропрокатным станам возрастают и с развитием науки и техники, обеспечивая дополнительные возможности данного оборудования, увеличивающие их производительность. С другой стороны, появляются требования к эксплуатационным свойствам, которые определяются снижением нагрузок на оборудование. Поэтому, актуальным считается как поиск решений по увеличению качества продукции, увеличение эргономичности в управлении процессом и снижение человеческих факторов, так и снижение нагрузок с целью увеличения ресурса оборудования.

### 1.3. Способы изготовления шаропрокатных валков

По технологии поперечно-винтовой прокатки в процессе постепенного врезания реборды валка в заготовку, производится приращение шага для обеспечения условия постоянства временных объемов. В классическом виде нарезка винтового калибра происходит на токарно-винторезных станках, которые ограничены дискретностью шага, поэтому вышеперечисленные методики калибровок сводятся к подбору оптимального набора шагов и характерных им пар сменных шестерен, для обеспечения наиболее равномерного обжатия. Изготовленные таким методом валки требуют обкатки на стане. Впервые возможность применения непрерывно-изменяющегося шага описана в литературе [18, 22], где было предположено применение специальных копируемых устройств, для его обеспечения. Одним из первых исследовал и использовал непрерывно-меняющийся шаг В.И. Котенок [23,24,62,77]. 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.

Согласно методу, предложенному В.И. Котенком, изменение шага калибра обеспечивает копируемый механизм к токарно-винторезному станку, а установку валков - специальная планшайба (рисунок 4.).

В механизме один конец ходового винта 1 шлицевой муфтой 2 соединен с выходным валом коробки подач токарного станка 3, а другой его конец – через жесткую муфту 4 с входным валом 5 зубчато-червячного редуктора 6 копируемого механизма. Червячный редуктор закреплен на плите и может перемещаться вместе с ходовым винтом вдоль его оси в направляющих рамы 17 копируемого механизма.

На выходном валу червячного колеса редуктора крепится кулачок 8, который гидроцилиндром 9 прижимается к опорному ролику 11,

установленному на стойке 10 рамы 17. Гидроцилиндр питается от насосной установки, которая поддерживает в гидросистеме заданное давление и создает необходимое усилие поджатия копирующего кулачка к ролику. Специальный станок комплектуется дополнительным электроприводом 16, который при необходимости, может быть подключен вместо штатного привода главного движения станка, что позволяет снизить наименьшую частоту вращения шпинделя с 5 до 0.5 -1 об/мин.

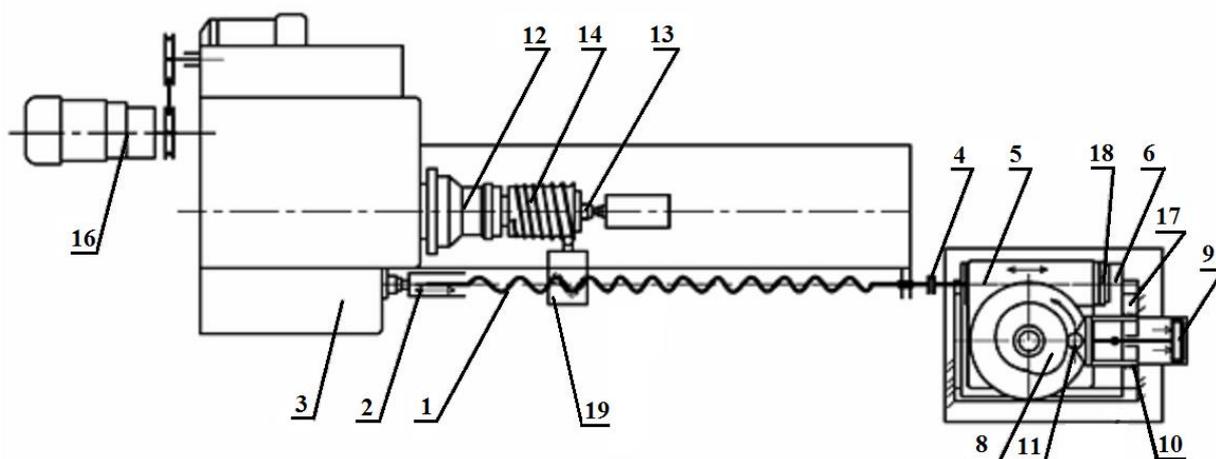


Рисунок 4. Технологический процесс изготовления валков ШПС с винтовым калибром непрерывно-изменяющегося шага на копирувальном полуавтомате

[62]

Также станок комплектуется специальной планшайбой 12 для быстрой установки заготовок валков 14. Вращение ходового винта станка через червячный редуктор передается кулачку. Так как кулачок имеет профиль переменного радиуса и при вращении опирается на неподвижный ролик, то во время работы всей системе - редуктор, ходовой винт, фартук 19 станка с резцедержателем - сообщается дополнительное осевое перемещение, что обеспечивает получение валка с винтовым ручьем заданного переменного шага. Для получения без зазорного зацепления в червячной паре редуктора, червяк выполнен с увеличивающейся толщиной витка. По мере износа червячной пары для устранения появившегося зазора, червяк смещают вдоль его оси. Эту регулировку осуществляют путем шлифовки разъемного кольца

18, установленного между корпусом редуктора и стаканом, в котором размещены упорные подшипники червяка [21,22,77].



Рисунок 5. Изготовление шаропрокатных валков на 5-координатном обрабатывающем центре.

Другим способом производства шаропрокатных валков является фрезеровка на 4-координатных обрабатывающих центрах фасонной сферической фрезой требуемого диаметра канавки, либо фрезеровка на 5-координатном обрабатывающем центре кукурузной фрезой с любым диаметром образующей (рисунок 5).

Авторы из Люблинского Технического университета используют в своих работах метод конечных элементов с построением 3-D модели. Этими учеными была предложена футуристическая модель конусообразных валков (рисунок 6) [38].

Создавая 3-D модель, даже при использовании дискретно-меняющегося шага, возможно оперативно варьировать параметрами подрезки реборды, вытяжки и приращения шага, получая схему нагрузок на элементы валка, но это не определяет оптимальность параметров равномерности обжатия.

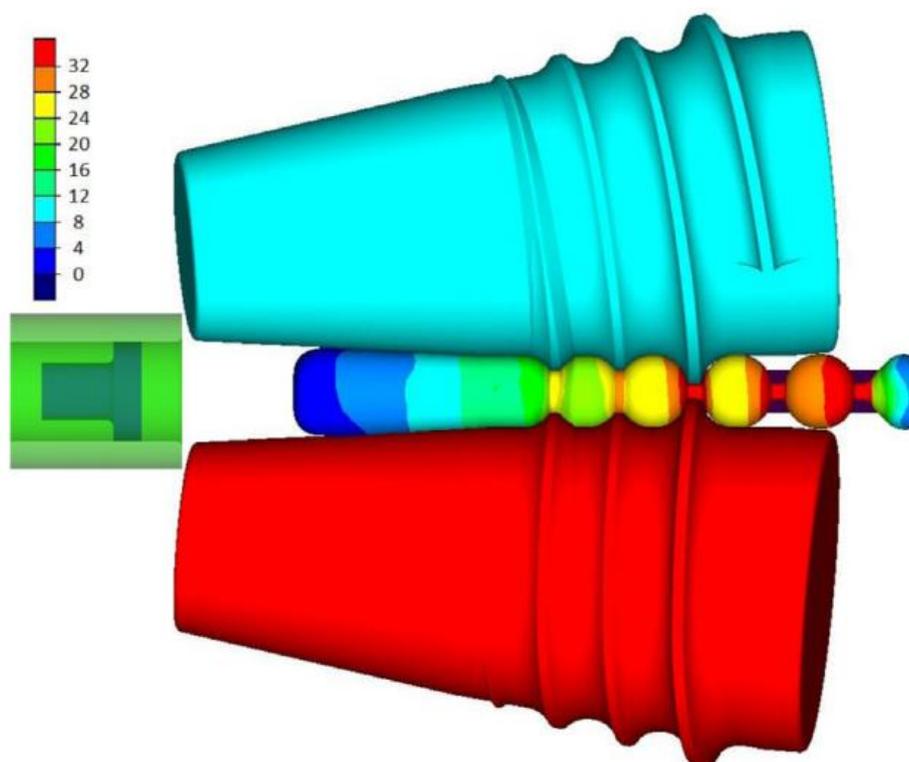


Рисунок 6. Модель конусообразных валков [38].

Все из перечисленных выше методов способны обеспечить изготовление шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом, что характеризует все современные калибровки шаропрокатных валков, однако каждый из них имеет ряд как достоинств, так и недостатков.

Преимущество метода обработки валков на копировальном токарном полуавтомате – это относительно низкая стоимость металлорежущего оборудования и отсутствие необходимости в высококвалифицированном персонале, т.к. сменные копиры будут автоматически определять параметр изменения шага.

Недостаток такого метода – это необходимость расчета геометрии и изготовления копира под каждую индивидуальную калибровку, требования к эксплуатации которых несут за собой создание дополнительных условий. Также производительность такого метода обработки является наиболее низкой.

Основное преимущество метода обработки на 4-х координатном обрабатывающем центре с использованием фасонной фрезы диаметром, соответствующим образующему диаметру канавки, является максимальная производительность (например, при изготовлении данным методом, комплект валков, с диаметром бочки валка 700 мм и длиной 600 мм, возможно получить за 36 часов, в отличие от токарной обработки, где при максимальной производительности аналогичный комплект изготавливается за 78 часов).

Недостаток данного способа, это повышенные затраты на инструмент (сферические фрезы), связанные с необходимостью замены фрезы при её критическом износе, и невозможности переточки для дальнейшей работы, т.к. требования к диаметру ручья напрямую связаны с диаметром фрезы.

Преимущество использования 5-координатного обрабатывающего центра с кукурузными фрезами – это получение профиля валка любой сложности, как для производства шаров, так и для производства любых периодических профилей, описанных в п.1.1, с максимальной точностью обрабатываемой поверхности за счет координации инструмента. Данный инструмент легко ремонтируется, с заменой быстрорежущих пластин. Также, при необходимости, для повышения производительности на данных станках, как и на 4-х координатных, возможно использование сферических фасонных фрез и работа 4-мя координатами без использования дополнительной окружной подачи.

Недостатком является высокая стоимость данного оборудования. Однако, с учетом того, что современные шаропрокатные станы требуют применения более «качественного» инструмента деформации, то цена

металлорежущего оборудования не существенна на фоне цены остального оборудования шаропрокатных станов, в том числе и прокатных клетей.

Таким образом, изготовление шаропрокатных валков обусловлено существующим оборудованием. На сегодняшний день наиболее рациональное выполнение требуемого профиля валка с соблюдением необходимой геометрии, а также требуемой производительности, представлено двумя методами: на копировальных токарных полуавтоматах, а также на фрезерных 4-х и 5-и координатных обрабатывающих центрах. Каждый из данных методов имеет свои достоинства и недостатки, но в условиях необходимости «качественного» изготовления валков, а также возможности получения поверхности валка любого возможного профиля, несмотря на высокую цену более рациональнее выбирать 5-координатные обрабатывающие центры.

#### **1.4. Выводы. Постановка цели и задач диссертационной работы**

Целью данной диссертационной работы является совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки и технологии производства мелющих шаров.

Поэтому, одной из задач будет являться повышение ресурса инструмента деформации шаропрокатных станов, в том числе, исследование причин, видов износа, распределение износа по поверхности инструмента деформации. Результатом решения данной задачи будет обоснование и разработка мероприятий по увеличению ресурса шаропрокатных валков и проводок.

Следующей задачей диссертационной работы является разработка перспективных калибровок шаропрокатных валков, включающая аналитическое описание кривых, являющихся образующими для элементов калибровки. Этапами решения является детальное рассмотрение каждого параметра калибровки (подъем и толщина реборды, шаг и развалка калибра),

а также влияния данных параметров на режимы прокатки. Немаловажно сравнить различные методы разработки калибровок и процессов прокатки, включая аналитический, опытный, а также моделирование МКЭ, и доказать степень сходимости результатов для валков с непрерывно-изменяющимися параметрами. Результатом решения данной задачи должна стать разработка новых калибровок шаропрокатных валков, используя которые возможно получить максимально эффективные режимы прокатки, а также определение наиболее рациональных режимов прокатки и настройки стана.

Актуальным остается решение задач прикладного характера по совершенствованию технологических режимов производства мелющих шаров (включающих создание процессов с максимальной автоматизацией, например, оперативный контроль оптимизации настроек стана или определение прокаливаемости шаров в On-line режиме для управления параметрами термообработки и пр.) и совершенствованию технологии производства (включая уменьшение расхода металла, повышение качества продукции как по геометрическим параметрам, так и по объемной твердости и др.)

## **2. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ И ПРИВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ**

### **2.1. Исследование причин разрушения и износа привалковой арматуры и шаропрокатных валков в условиях существующих калибровок**

Как было показано в п.п.1.2, геометрия мелющих шаров может иметь значительные допуски по ГОСТ 7524-2015 [63], поэтому линейный износ валков и привалковой арматуры (определяемый по нормали к поверхности трения), не имеет жесткой регламентации, как например, при сортовой прокатке. Как показывает практика, на рабочих поверхностях валков могут наблюдаться выкрашивания, при которых геометрические характеристики готовой продукции продолжают соответствовать допускаемым.

Износ, соответствующий предельному состоянию калибра прокатного вала в соответствии с ГОСТ 27674 [78], называют предельным износом. Однако, отбраковка валков по критерию предельного износа не рациональна, т.к. при этом уменьшается возможное число переточек вала на другой ремонтный размер. Поэтому, на практике руководствуются значением допустимого износа, при котором валок ещё сохраняет работоспособность.

Наиболее изнашиваемыми элементами шаропрокатного стана являются валки и проводки. На сегодняшний день ресурс комплекта валков до переточки составляет 600 – 2500 т проката, в зависимости от применяемой калибровки и производимого сортамента. Формообразование шара начинается в момент врезания реборды вала в заготовку, поэтому реборды наиболее подвержены износу. В настоящий момент существует две основных разновидности калибровок шаропрокатных валков.

Первая разновидность предполагает, что в зоне захвата заготовки реборда имеет минимальную толщину, а по мере смещения винтовой линии от зоны захвата к зоне отделения перемычки, её толщина увеличивается.

Конструктивные особенности второй противоположны - в зоне захвата толщина реборды максимальна, а по мере её перемещения на протяжении формирующего участка валка, она уменьшается.

Обе разновидности калибровок удовлетворяют основному условию разработки винтовых калибров шаропрокатных валков – сохранению постоянства объема металла, ограниченного ребордами валка на протяжении всего процесса прокатки, однако характер износа на данных калибровках различен. Конструктивные отличия определяют появление зон интенсивного износа и, в целом, ресурс шаропрокатных валков. Изучение характера, причин и зон распространения износа на поверхности шаропрокатного валка в зависимости от той или иной применяемой калибровки, является актуальной задачей.

Для первой разновидности калибровки, где толщина реборды в зоне захвата минимальна, наибольший износ обнаружен именно в этой зоне, как показано на рисунке 7. В данном случае критерием отбраковки валков по предельному износу будет являться недостаточное сцепление заготовки с валком, которое возникает из-за уменьшения высоты реборды в зоне захвата или её выкрашивания. Следствием является прекращение вращения заготовки, с дальнейшим переходом проката на «рейку» (рисунок 8).

Для второго варианта калибровок (с максимальной толщиной реборды в зоне захвата), разрушение реборд и их наибольший износ наблюдаются в зоне скрещивания валков, где происходит отделение шара (рисунок 9). Критерием отбраковки и предельного износа валка является появление перемычек между шарами, и в дальнейшем, образование «гирлянд» (рисунок 10).

Проводки шаропрокатных станов обеспечивают удержание заготовки в оси прокатки. Критерием предельного износа проводок является линейный износ рабочей поверхности, приводящий к выходу заготовки из оси прокатки, следствием чего также является появление перемычек. Стойкость

проводок составляет от 100 т до 600 т проката, в зависимости от диаметра шара, применяемой калибровки и отработанного ресурса валка.

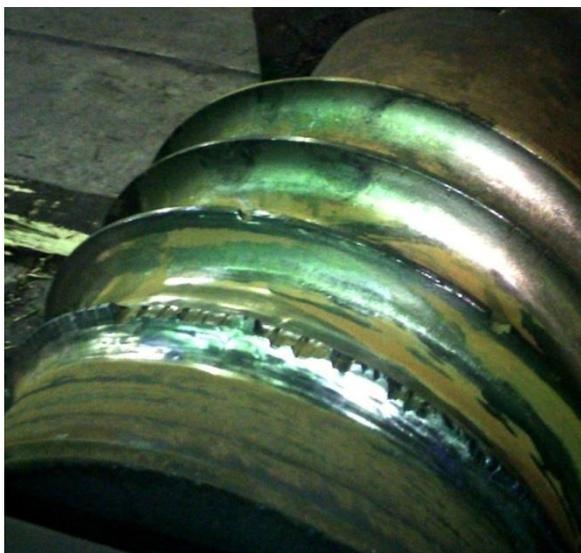


Рисунок 7. Вид изношенной поверхности и разрушения реборд валков в зоне захвата



Рисунок 8. «Рейка», недокат, образующийся при отсутствии вращения заготовки



Рисунок 9. Вид изношенной поверхности и разрушения реборды в зоне скрещивания валков



Рисунок 10. «Гирлянда» - недокат, образованный при отсутствии удаления перемычки

Износ проводок может быть существенным (рисунок 11), например, при производстве шара условным диаметром 120 мм, износ может достигать 10-12 мм на глубину проводки без заметного влияния на качество получаемых шаров.



Рисунок 11. Вид изношенной поверхности проводок шаропрокатного стана

Наступление состояния предельного износа проводок приводит к некорректной работе стана, увеличению нагрузок на валки и может явиться причиной недокатов. В связи с этим, увеличение стойкости проводок является не менее важной задачей в области ПВП, чем стойкость самих валков.

Исследования износа прокатного инструмента проведены в условиях производственного эксперимента при производстве шара условным диаметром 120 мм, как профиля, при прокатке которого создаются максимальные усилия и деформации. Исследования были выполнены в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК»:

- на шаропрокатном стане 80-125, с рабочей клетью «ВНИИМЕТМАШ» ЦКБММ-45;

- на шаропрокатном стане 60-120, с рабочей клетью «КОСН-АМТ»,

Сравнительная характеристика данных станов и геометрия шаропрокатных валков, приведена в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительные характеристики станов 80-125, 60-120 и шаропрокатных валков, при производстве шара условным диаметром 120 мм

Параметр	Стан 80-125	Стан 60-120
Параметры станов		
Диапазон производимых шаров	80-120	60-120
Мощность эл. привода, кВт	900	1480
Рабочий диапазон частот вращения валков, об/мин	30-80	30-100
Уравновешивание валков	Механическое пружинное	Гидравлическое
Горизонтальное сведение валков	Электромеханическое комбинированное	Автоматизированное электромеханическое с индивидуальными приводами
Настройка вертикального угла	Механическое с ручным приводом 0-7°	Автоматизированное с электромеханическим приводом 0-10°
Параметры шаропрокатных валков для производства шара 120 мм		
Число заходов валка	Однозаходный	Однозаходный
Частота вращения валков об/мин	40	55
Диаметр бочки левого валка, мм	690	694
Диаметр бочки правого валка, мм	668,4	684
Длина бочки валка, мм	600	600
Характеристика шага	Переменный дискретный, 8 шагов	Переменный дискретный, 6 шагов
Толщина реборды на заходе, мм	3,99	49,5
Толщина реборды в месте скрещивания валков (отделения перемычки)	18,68	9,5
Длина формирующей / отделочной части валка, мм	405 / 195	350 / 250
Материал валка	Сталь 35ХГСА	Сталь 5ХНМ
Твердость после термообработки	48-52 HRC	42-48 HRC

В таблице 3 видны принципиальные отличия существующих разновидностей калибровок шаропрокатных валков и связанная с этим специфика износа. Для производства шара условным диаметром 120 мм, на валках стана 80-125 – интенсивный износ наблюдается в зоне захвата (см. рисунок 7), в свою очередь на валках стана 60-120 – интенсивность износа выше на отрезной части валка, в месте отделения перемычки (см. рисунок 9). Это, в первую очередь, объясняется величиной толщины реборды (таблица 3).

Для валков стана 80-125 толщина реборды в месте захвата более чем в 10 раз меньше, чем для валков стана 60-120, а в зоне скрещивания, наоборот, реборда в 2 раза шире. Существенное влияние на разрушение и износ винтового калибра оказывают механические свойства рабочего слоя, зависящие от материала и термической обработки. Например, на инструменте деформации стана 80-125, наблюдалось хрупкое разрушение (выкрашивание) реборд (рисунок 7), при смене материала валков на стане 60-120 следов выкрашивания на торцевой части реборды не обнаружено.

При рационально проведенной калибровке валка износ реборд характеризуется постепенным уменьшением геометрических размеров, в первую очередь, высоты реборды [79]. Разрушение реборды с отделением значительных её участков, считается аварийным.



Рисунок 12. Разрушение реборды валка в зоне отделения перемычки

Для выявления причин установившегося износа и аварийного разрушения были взяты: образец отделившейся от валка (рисунок 12), разрушенной в зоне скрещивания валков, реборды 30x250 мм (рисунок 13) и поперечные темплеты изношенных калибров [80,81]. Оценка микроструктуры производилась на оптическом микроскопе «Leica MEF4A» на поперечных шлифах до и после травления в 3%-ном спиртовом растворе азотной кислоты, при увеличениях  $\times 50 \dots 500$ .

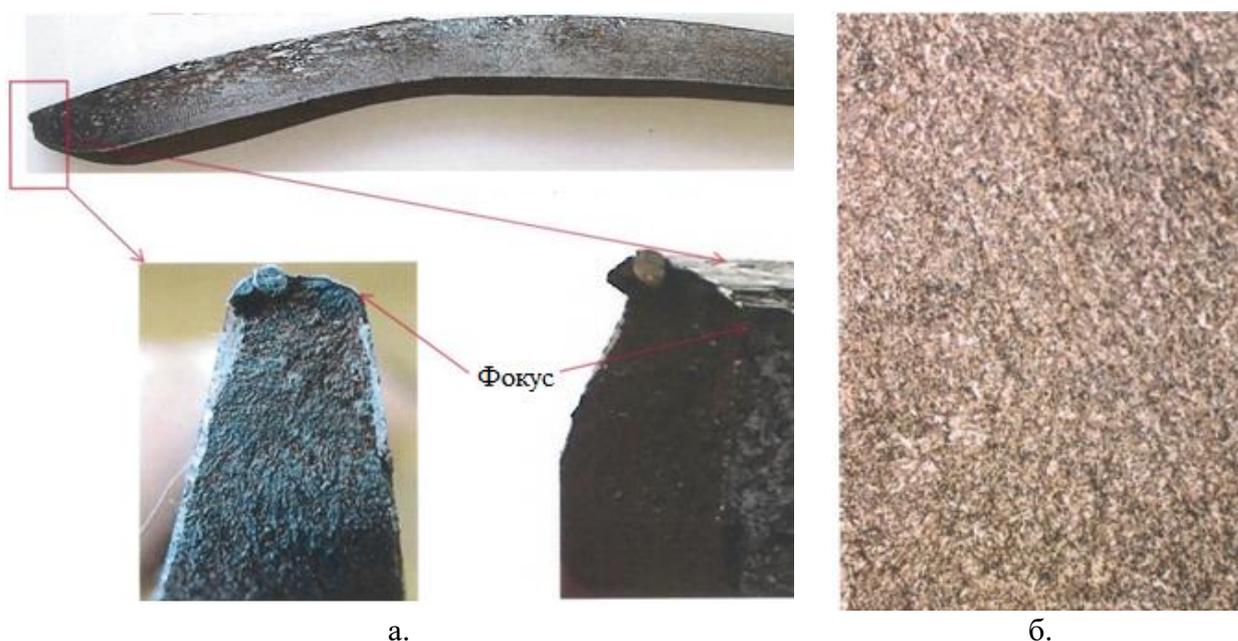


Рисунок 13. Внешний вид (а) и структура  $\times 500$  (б) основного металла реборды

Согласно результатам исследования, микроструктура основного металла реборды валка равномерная, представляет собой отпускаемый мартенсит (рисунок 13.б).

На боковой поверхности реборды и на ее вершине наблюдаются участки заедания и адгезионного схватывания с материалом заготовки (рисунок 14.а) с последующим отрывом части поверхности валка.

Изменённая структура металла валка на участке адгезионного взаимодействия и появление микротрещин в результате эксплуатации представлены на рисунке 14.б. Микроанализом под местом фокуса разрушения выявлен белый, слаботравящийся слой повышенной твердости,

глубиной до 0,35 мм, представляющий очевидно мартенсит (рисунок 14.в) [82].

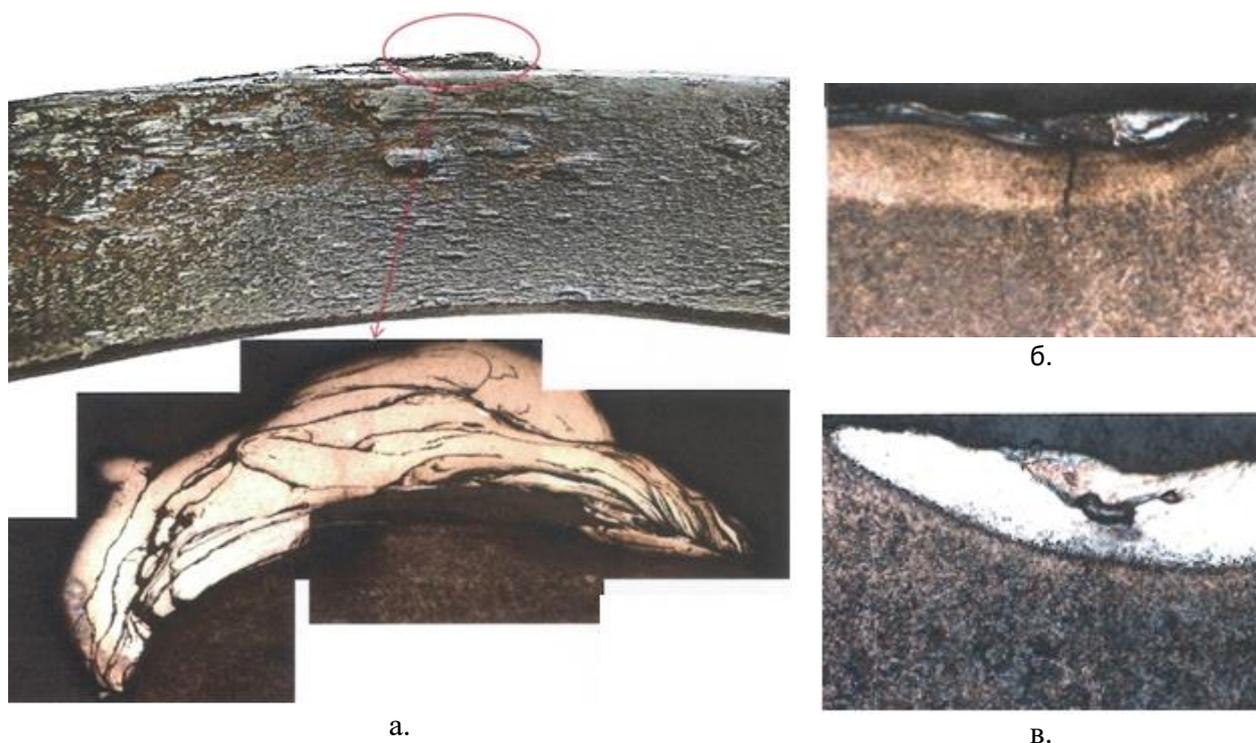


Рисунок 14. Микроструктура металла реборды по месту фокуса разрушения:

а – приварившийся металл прокатываемой заготовки на вершине реборды (x50); б – микротрещины и изменение структуры (x100); в – белый слой (x50)

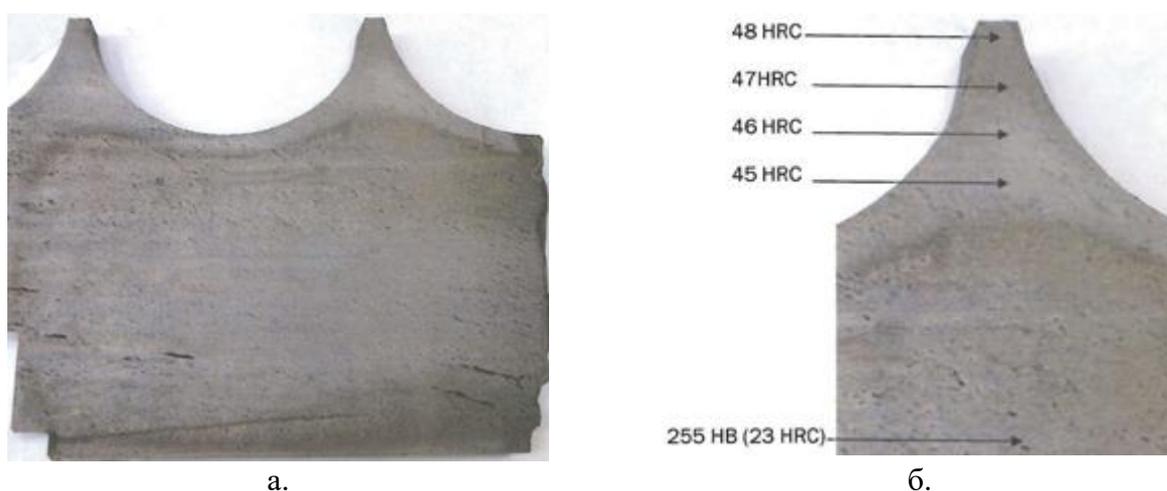


Рисунок 15. Макростроение(а) и распределение твердости по сечению валка (б)

Макроанализ поперечных темплетов сечения (рисунок 15.а), выполненный методом глубокого травления в горячем 50% водном растворе соляной кислоты, показал, что в районе разрушения, выявлены:

- закаленный слой, идущий по впадинам калибра на глубину 10 мм,
- сквозная закалка реборд калибра,
- пятнистая ликвация 3 балла по ГОСТ 10243-75 [83]

Распределение твердости по сечению валка неравномерное (представлено на рисунке 15.б) и составляет на поверхности от 48 HRC с постепенным снижением до 45 HRC. Твердость основного металла, составила 255 НВ.

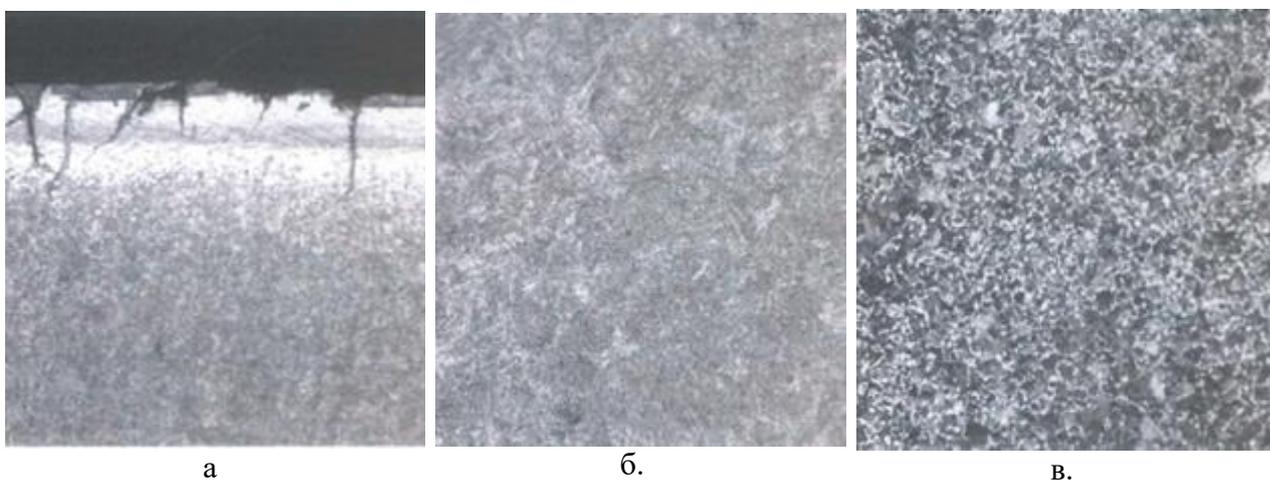


Рисунок 16. Структура валка после эксплуатации:

а – поверхность, х100, б – закаленный слой х500, в – основной металл х100

Микроанализ валка (рисунок 16.) выявил наличие недопустимого обезуглероженного слоя глубиной до 0,3 мм на поверхности калибра. По одной из боковых сторон выявлены термические трещины глубиной до 15 мм и выкрашивание металла по ним (рисунок 16.а).

Микроструктура закаленного слоя, идущего по калибрам, представляет собой отпускаемый мартенсит с участками остаточного аустенита (рисунок 16.б). Структура основного металла феррито-перлитная разнотельная с размером зерна 6-8 номера ГОСТ 5639-82 [84] (рисунок 16.в).

В результате проведенных исследований установлено, что причинами износа и разрушения реборды являются:

- малая толщина реборды, приводящая к ее интенсивному нагреву во время работы от горячего металла, и в комбинации с охлаждением к термической усталости и образованию сетки разгара.

- низкие показатели теплостойкости используемого материала для валков, наряду с закалкой на повышенную твердость усугубляют процессы износа и разрушения.

Для валков стана 60-120 наибольший износ реборд характерен в зоне скрещивания валков - месте отделения перемычки. Причем процессы износа и разрушения в большей степени характерны для отрезного валка.

Причинами разрушения и износа в данной зоне являются:

- создание переменных значений нагрузок за счет разности диаметров валков и появления знакопеременных усилий, необходимых для закручивания шара и отделения перемычки. Особенностью формообразования в данной зоне является то, что работа по врезанию реборды в металл осуществляется только за счет отрезного валка.

- малая толщина реборды, ускоряющая процессы термической усталости и снижающая прочностные характеристики.

Для всех валков без исключения доминирующим являлось механическое изнашивание (усталостное и абразивное), наряду с этим на рабочих поверхностях обнаруживались следы молекулярно - механического изнашивания (схватывание, заедание) и коррозионно-механического – окисления рабочей поверхности.

Для определения рационального метода калибровки и параметров реборды в той или иной зоне в рамках производственного эксперимента, произведено исследование ресурса и влияние износа валков на энергосиловые характеристики шаропрокатных станов 80-125 и 60-120.

В настоящее время замена валков в клети прокатного стана производится либо при достижении допустимого износа (выработке теоретического ресурса валка), либо в аварийном случае при систематическом появлении недокатов (дефектов типа «реек»,

«карандашей», «гирлянд»), вследствие критического разрушения реборд. Теоретический ресурс для валков, при производстве шара условным диаметром 120 мм, для стана 80-125 составляет 1600 т, для стана 60-120 – 1000 т.

В таблицах 4,5 представлены показатели линейного износа валков и направляющих проводок. На проводках значения износа снимались по точке максимального износа с периодичностью раз в смену.

Таблица 4. Линейный износ валков и проводок стана 80-125

Производство шаров (за смену/всего), тонн.	Высота реборд на заходе, мм.	Износ верхней проводки, (за смену/всего)мм.	Износ нижней проводки, (за смену/всего)мм.	Усилие прокатки (среднее), кН
205	5,4	4,5	0,5	595
198/403	5,4	1,5/6	0/0,5	572
208/611	5,4	1,5/7,5	0/0,5	551
202/813	5,3	2,6/10,1 – замена	0/0,5	560
206/1019	5,3	2,1/4,7	0/0,5	572
196/1215	5,2	3,3/8	0,5/1	589
211/1426	5,2	3,1/11,1 – замена	0,5/1,5	599
202/1628	5,0	4,4	1,5/3	619
199/1827	4,8	7,1/11,5 – замена	1,5/4,5	606
165/1992	4,7	8,9 – замена	4,5/9 - замена	687
204/2196	4,6	11,4	8,1	781

Анализ данных таблицы 4 показал, что в условиях стана 80-125 износ реборд валков в зоне захвата заготовки не значителен на протяжении  $\frac{3}{4}$  объема прокатной кампании (рисунок 17). Возрастание интенсивности износа после 1500 т произведенной продукции связано с накоплением объема усталостных повреждений рабочего слоя и переходу к выкрашиванию реборд и их ускоренному разрушению. Ориентировочно, с этого же момента начинается интенсивный износ проводок с вынужденными частыми их заменами. Настройка стана осуществлена таким образом, что деформируемая заготовка в процессе прокатки прижимается к верхней проводке, валок большего диаметра (отрезной) направляет заготовку к ней, поэтому износ

верхней проводки существенно превышает износ нижней. За одну прокатную кампанию верхняя проводка была заменена 5 раз. Замена нижней проводки производилась один раз под конец кампании.

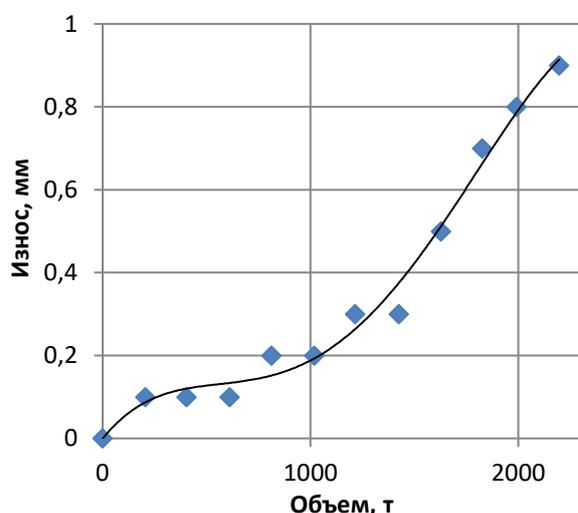


Рисунок 17. Линейный износ реборд валков в зоне захвата заготовки (мм) в зависимости от объема произведенной продукции (т) в условиях стана 80-125

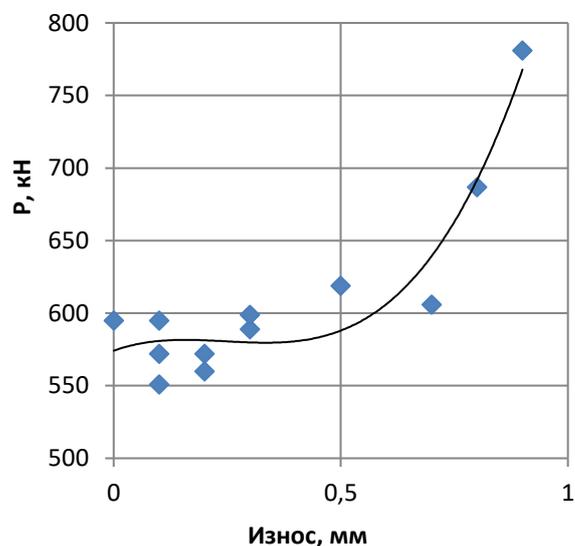


Рисунок 18. Влияние износа реборд валков (мм) на усилие прокатки (кН) в условиях стана 80-125

Таблица 5. Линейный износ валков и проводок стана 60-120

Производство шаров (за смену / всего), т	Высота реборд отрезного валка в зоне скрещивания валков, мм	Износ верхней проводки, (за смену / всего) мм	Износ нижней проводки, (за смену / всего) мм	Усилие прокатки (среднее), кН
249	57	3	0	743
236/485	57	4/7 – замена	0	727
96/581	56	1	0	732
255/836	54	9/10 – замена	1	771
182/1018	52	11	1/2	789

Износ прокатного инструмента и привалковой арматуры оказывает влияние на рост усилия прокатки (рисунок 19), который начинает значительно наблюдаться также по прохождению  $\frac{3}{4}$  объема прокатной кампании.

Настройка стана 60-120, также как и стана 80-125, рассчитана на настройку с давлением на верхнюю проводку, что также приводит к преимущественному износу верхней проводки. Нагрузки при прокатке на стане 60-120 на протяжении всей кампании меняются незначительно с 743 до 789 кН, хрупкого разрушения с выкрашиванием реборд не наблюдалось, износ реборд происходил только на отрезном валке в зоне отделения перемычки. Преодолев рубеж 1000 тонн проката, высота реборды отрезного валка стала составлять 52 мм, что сравнимо с высотой реборды неотрезного валка, после чего шар перестало закручивать, т.к. исчезли знакопеременные нагрузки и перемычки перестали отделяться с образованием «гирлянд» (см. рисунок 10).

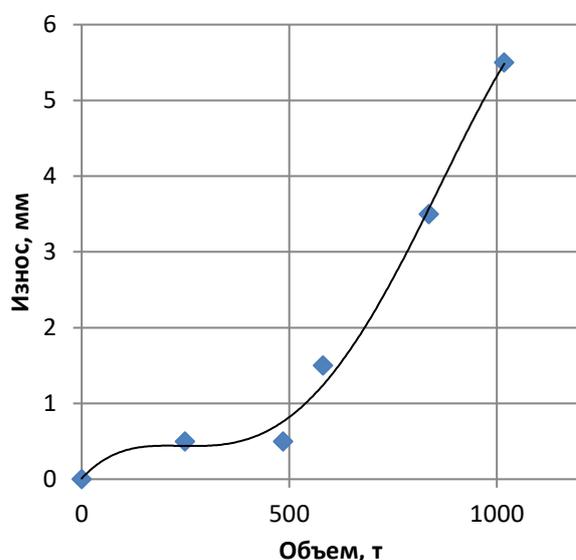


Рисунок 19. Линейный износ реборд валков в зоне скрещивания валков (мм) в зависимости от объема произведенной продукции (т) в условиях стана 60-120

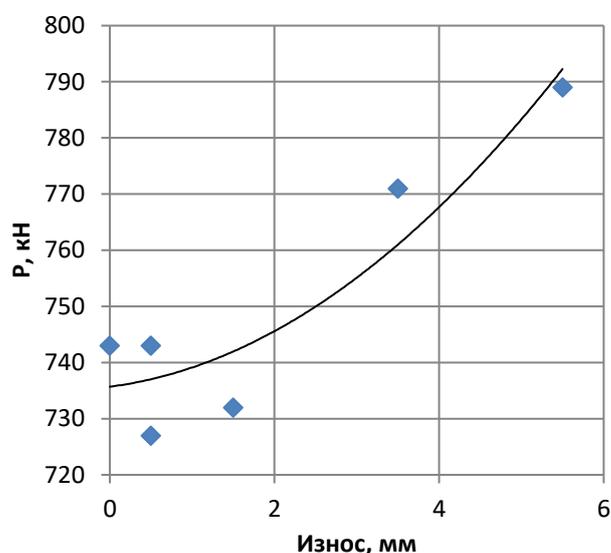


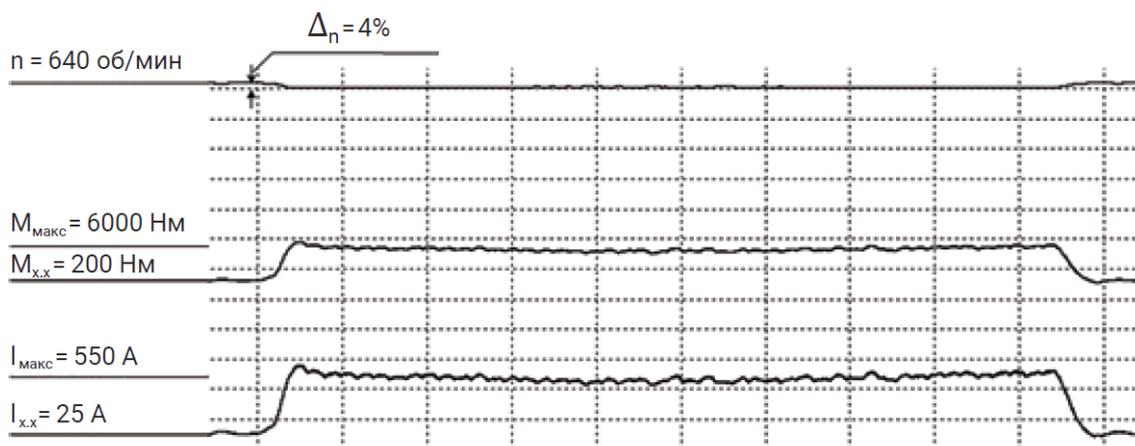
Рисунок 20. Влияние износа реборд валков (мм) на усилие прокатки (кН) в условиях стана 60-120

Анализ данных таблицы 5 показал, что в условиях стана 60-120 износ реборд валков в зоне скрещивания валков (зоне отделения перемычки) не значителен на протяжении половины объема прокатной кампании (рисунок 19), хотя объем выпущенной прокатной продукции при этом типе калибровки более чем в 2 раза меньше, чем на стане 80-125. Возрастание интенсивности износа после 500 т произведенной продукции также связано с накоплением усталостных повреждений рабочего слоя. Начиная с  $\frac{1}{2}$  прокатной кампании, наблюдается резкий рост усилия прокатки (рисунок 20).

Для определения рациональности той или иной калибровки также был проведен анализ энергосиловых параметров. На рисунке 21 (а,б) представлены Осциллограммы, параметров работы прокатных двигателей станов 80-125 и 60-120 соответственно.

Силовые характеристики стана 80-125, приведенные на рисунке 21(а) практически постоянны на протяжении времени обработки (прокатки) одной заготовки. На рисунке 21(б), в условиях стана 60-120 наблюдаются значительные пульсации значений тока двигателя, и, как следствие, крутящего момента и частоты вращения, причем максимальным значениям  $I$  и  $M$  соответствует минимальная частота вращения ( $n$ ). Этот процесс характеризует падение напряжения согласно вольт-амперной характеристике, связанное с превышением максимально-допустимых значений тока, который прямопропорционален крутящему моменту и усилию прокатки. Характер изменения этих характеристик, в первую очередь, определяется видом калибровки применяемых прокатных валков. В первом случае в зоне захвата в заготовку врезается реборда валка относительно малой толщины, процесс нарастания тока и момента плавный, частота вращения практически не уменьшается. Это благоприятно сказывается на динамике работы валков и механизмов стана. Во втором случае врезка в заготовку реборды значительной толщины создаёт высокие суммарные нагрузки, сопровождающиеся жесткими динамическими ударами, после которых

моментные характеристики снижаются, достигая минимальных значений, повторяя цикл на каждом обороте валка.



а.



б.

Рисунок 21. Осциллограммы, параметров работы прокатного двигателя при прокатке шара условным диаметром 120 мм для станков

а. -80-125; б. - 60-120

$n$  – частота вращения вала двигателя,

$M_{\text{макс}}$  и  $M_{\text{х.х}}$  – крутящие моменты максимальный и холостого хода, соответственно,

$I_{\text{макс}}$  и  $I_{\text{мин}}$  – ток двигателя максимальный и минимальный.

Второй вид применяемых калибровок, несомненно, увеличивает живучесть реборд в зоне захвата, однако динамические удары в целом неблагоприятно действуют как на инструмент деформации, так и на другие механизмы стана.

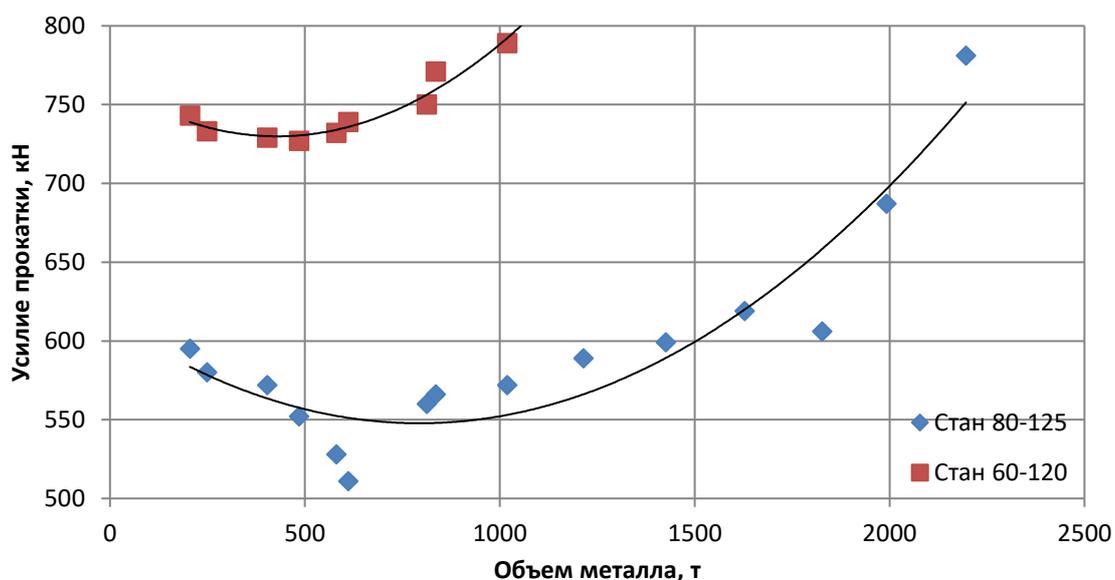


Рисунок 22. Усилия прокатки за весь период работы комплекта валков

Кроме этого, согласно данным таблиц 4,5 и рисунка 22. видно, что эксплуатация валков с калибровкой второго типа (где толщина реборды имеет максимальные значения в зоне захвата) приводит к повышению средних нагрузок (до 30%) и двукратному сокращению их ресурса.

Семейство кривых, полученных на рисунке 22., показывает, что нагрузки на двигатель вытекают из процессов износа, где примерно 1/4 периода жизни валка происходит приработка валков и падение нагрузок, после чего износ валков приводит с начала к замедленному, а затем к интенсивному росту нагрузки. Максимальные значения суммарной нагрузки в обеих применяемых калибровках примерно одного порядка (750-800 кН). А, отталкиваясь от того, что кривые износа показывают высокую степень подобия относительно друг друга, можно судить о том, что калибровка, имеющая большую энергоэффективность на новых валках (в частности меньшие нагрузки при прокатке), приведёт к существенному увеличению их ресурса.

Интенсивно-возрастающий характер изнашивания рабочих поверхностей при увеличении величины самого износа характерен как для валков, так и для проводок шаропрокатного стана.

Также следует отметить, что использовать высоту реборд шаропрокатных валков как единственный критерий их допустимого износа нельзя. К примеру, на валках для стана 60-120 при износе, когда высота реборды отрезного валка в месте скрещивания становится менее 54 мм, систематически образуются недокаты, т.е. дефект вида «гирлянды». Правильная настройка стана в этом случае позволит устранить появление этого дефекта и исключит проведение преждевременной перевалки. И, наоборот, не выработав среднестатистического ресурса, валки могут достигнуть состояния критического износа, и их дальнейшая эксплуатация становится невозможна. Для обеспечения оперативного определения параметров износа в производственных условиях следует использовать шаблоны индивидуально под каждую калибровку (рисунок 23). При периодическом контроле геометрии основных параметров валков можно добиться существенного увеличения ресурса валков и преждевременно выявить критический износ [85].



Рисунок 23. Шаблон для контроля глубины износа реборд валков

1. Зона допустимого износа (выделена зеленым)
2. Зона предельного износа (выделена красным)

Таким образом, исследование причин разрушения и износа привалковой арматуры и шаропрокатных валков в условиях существующих калибровок показали:

- на валках всех исследованных клетей доминирующим является механическое изнашивание (усталостное и абразивное), обнаружены очаги молекулярно-механического изнашивания (заедание, схватывание) с участками измененной структуры (до 0.3 мм) под вырванным металлом и трещинами, распространяющимися в глубину реборды;

- выраженную дифференциацию износа по длине бочки шаропрокатного валка. Зона наиболее интенсивного износа шаропрокатных валков зависит от толщины реборды;

- наиболее подвержены износу две области валков: зона захвата заготовки и зона отделения перемычки (зона скрещивания валков), в которых износ достигает предельных значений в первую очередь;

- степень износа как для валков, так и для проводок интенсивно возрастает по мере самого износа.

- наиболее предпочтительна калибровка, при которой толщина реборды увеличивается от зоны захвата к зоне скрещивания, при этом толщина реборды не должна быть ниже минимальных значений, отвечающих прочностным и эксплуатационным требованиям.

- предельный ресурс работы валков за одну кампанию необходимо определять по фактическому уменьшению высоты реборд в критических зонах, а не по среднестатистическому ресурсу, что в целом устранил появление недокатов и увеличит полный ресурс валков.

- требуется разработка мероприятий по уменьшению степени износа валков в критических зонах и снижению степени износа рабочей поверхности проводок.

## 2.2. Увеличение стойкости валков за счет применения переменной частоты вращения

В процессе поперечной прокатки ключевую роль имеет момент захвата заготовки, когда ей придается вращение. Исходя из условия захвата заготовки, определяющим параметром является окружное ускорение  $\Omega$ . Его допустимое при поперечно-винтовой прокатке (ПВП) значение зависит от ряда факторов: диаметра заготовки; шероховатости контактных поверхностей; геометрии валков в зоне захвата заготовки.

Для определения степени влияния окружного ускорения на динамические нагрузки, выразим его  $\Omega$  (рисунок 24) из уравнения суммы моментов при условии вращения заготовки [86]

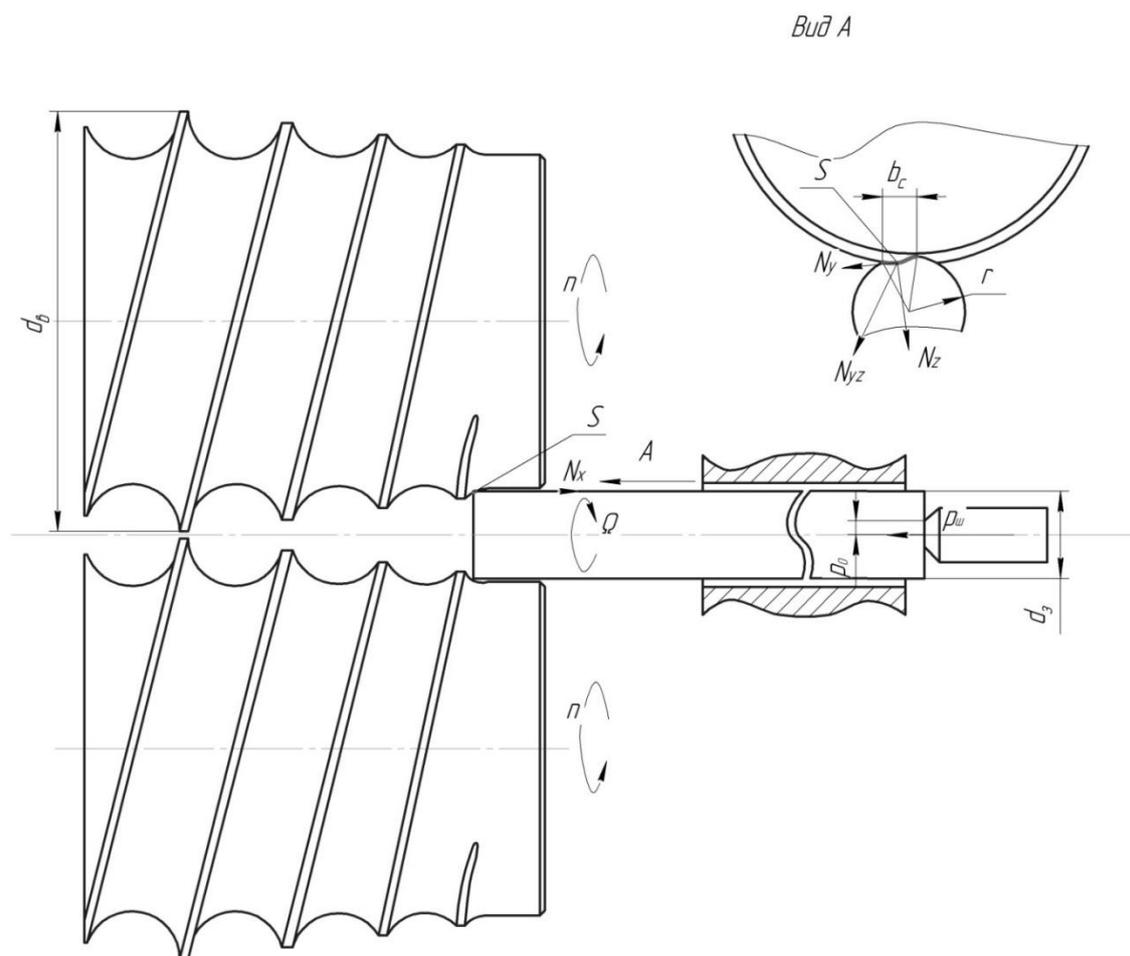


Рисунок 24. Схема действия сил и ускорение заготовки в момент захвата.

$$\Omega < \frac{Nr \left[ \mu m_m - \frac{1}{2} (1 + i) \xi_c \right] - \frac{2}{3} \pi p_{ш} f \rho_0^3}{\frac{r^2}{2} G}, \quad (1)$$

где

$r$  - радиус заготовки, м

$\mu$  - коэффициент трения при вращении заготовки,

$N$  - нормальное давление (усилие прокатки), Н

$m_T$  - проекция единичного вектора для равнодействующей силы трения,

$i$  - отношение радиуса заготовки и рабочего радиуса валка,  $r_3/r_6 = d_3/d_B$

$\xi_c$  - угол захвата заготовки,

$$\xi_c = b_c/r$$

где  $b_c$  – ширина смятия

$p_{ш}$  - нормальное контактное напряжение на торце штанги с заготовкой, Па

$f$  - коэффициент внешнего трения, возникающий за счет перемещения заготовки по водному желобу и по вводной трубе.

$\rho_0$  - текущее значение радиуса задающей штанги, м

$G$  - масса заготовки, кг

$\Omega$  - окружное ускорение заготовки, рад/сек<sup>2</sup>

Исходя из данного выражения видно, что ускорение, необходимое для захвата заготовки, будет зависеть от размеров заготовки, ее массы, а также усилия прокатки.

На действующих шаропрокатных станах заготовка задается в валки с нулевым окружным ускорением и вращение ей придается валками после захвата, поэтому ускорение будет выражаться по формуле (2):

$$\Omega = \frac{d_6 n \pi}{d_3 30 t_{раз}}, \quad (2)$$

где  $n$  - частота вращения валков об/мин,

$d_6$  - диаметр валка,

$d_3$  - диаметр заготовки, равный  $2r$ ,

$t_{разг}$  – время разгона заготовки до рабочей частоты вращения, усилие прокатки  $N$  выражаем через контактное давление,

$$N = pS, \quad (3)$$

где  $p$  - контактное давление, Па

$S$  - площадь контакта в момент захвата, м<sup>2</sup>.

Площадь в момент захвата мала и определяется контакту реборды вала с заготовкой (в отличие от устоявшегося режима, где она будет эквивалентна контакту по всей длине вала), что при прочих равных условиях будет указывать на рост контактного давления. Контактная площадь определяется по формуле (4)

$$F = \int_s^H b_x dx, \quad (4)$$

где

$F$  (определяется на каждом витке как сумма  $F_{ab}$  и  $F_{bB1}$  (рис 25)

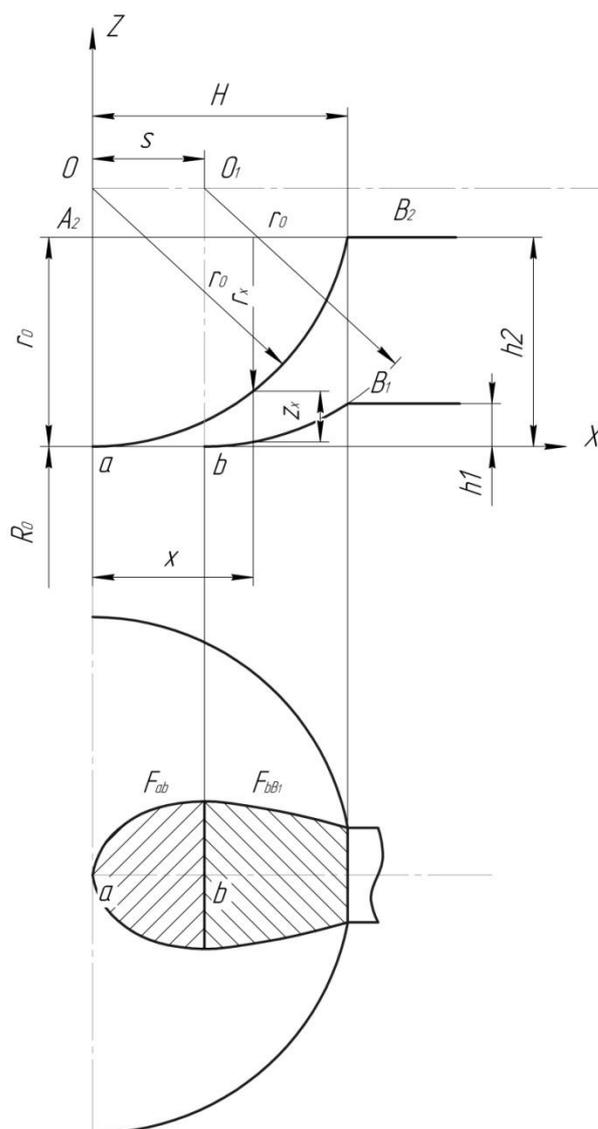
$b_x$  - условная ширина контакта металла с валком, м

$s, H$  - параметры подачи заготовки, м.

Начало процесса прокатки характеризуется захватом заготовки. После одного оборота вала меняется характер обжатия. Участок  $ab$ , на котором из цилиндрической заготовки длиной  $s$  формируется сфера, и участок  $bB_1$ , где из сферы большего диаметра формируется сфера меньшего диаметра, начинают перестраиваться, а после полного объединения в одну единую линию  $aB_2$  начинается работа калибрующего участка вала, где калибр уже заполняется и имеет максимальное значение усилий, поэтому, в качестве основных 3-х положений заготовки в калибре для дальнейших расчетов, выбираем момент захвата заготовки, состояние после одного оборота вала и стадию полного заполнения калибра.

Из уравнения (2) выражаем допустимую частоту вращения вала, подставив  $\Omega$  и  $N$  из уравнений (1,3):

$$n = \frac{30d_3 t_{\text{раз2}} (2pSr \left[ \mu m_m - \frac{1}{2}(1+i)\gamma \right] - \frac{4}{3}\pi p_{\text{ш}} f \rho_0^3)}{d_6 \pi G} \quad (5)$$



$H$  – расстояние от условного центра винтовой линии основного шага до ближайшей реборды,  
 $S$  - развалка калибра,  
 $O$  – условный центр винтовой линии основного шага,  
 $O$  – условный центр винтовой линии развалки,  
 $R_0$  – радиус валка до дна калибра  
 $r_0$  - радиус образующей винтовой канавки  
 $x$  – условная координата, определяемая для каждого положения  
 $r_x$  - радиус врезки в условной координате  $x$   
 $Z_x$  - единичное обжатие, определяемое в условной координате  $x$ ,  
 $h_1$  - высота реборды предыдущего положения валка до единичного обжатия  
 $h_2$  - высота реборды последующего положения валка после обжатия

Рисунок 25. Схема обжатия

Рассчитаем допустимую частоту вращения валков шаропрокатного стана для профилей с диаметрами заготовок 60, 80, 100, 120 мм, при этом задаемся допустимым контактным давлением  $p = 50$  МПа, при условии, что реборда валка в зоне захвата существенно мала и требует минимальных напряжений, соизмеримых со средними напряжениями в устоявшемся режиме. Для стали 35ХГСА, из которых изготовлены валки предел пропорциональности составляет  $\sigma_{0,2} = 640$  МПа, однако для достижения максимальной износостойкости необходимо, чтобы реборда не испытывала

изгибающих напряжений, поэтому выбор допустимого давления был произведен из предела упругости  $\sigma_{0,05}=600$  МПа, поэтому данное значение будет 12 кратным запасом для предела упругости материала валка и соизмеримо со значением контактного давления при устоявшемся процессе прокатки.

Для заготовки  $\varnothing 60$  мм допустимая частота вращения валков составит  $n=71$  об/мин и, соответственно, для  $\varnothing 80$  –  $n=72$  об/мин, для  $\varnothing 100$  –  $n=65$  об/мин, для  $\varnothing 120$  –  $n=63$  об/мин. По результатам расчета видно, что при увеличении диаметра заготовки, допустимая максимальная частота вращения в момент захвата заготовки изменяется незначительно, в отличие от частоты, необходимой для процесса прокатки.

Например, если в рабочем режиме прокатка заготовки  $\varnothing 60$  производится с частотой  $n=80$  об/мин, превышающей максимально-допустимое расчетное значение, это приведет к повышенным нагрузкам и, как следствие, износу инструмента деформации. В свою очередь, прокатка заготовки  $\varnothing 80$  при частоте вращения валков  $n=60$  об/мин не превышает максимально-допустимое расчетное значение и износ инструмента деформации минимален.

Экспериментальные исследования по данной работе были проведены в производственных условиях на станах горячей прокатки мелющих шаров 40-80 (клеть ЦКБММ-44) и 80-125(клеть ЦКБММ-45) АО "ЕВРАЗНТМК". В качестве опытных партий использовались заготовки  $\varnothing 60$ ,  $\varnothing 80$ ,  $\varnothing 100$ ,  $\varnothing 120$  из марки стали Ш-3Г (состав, % масс: углерода 0,7-0,75; кремния – 0,17-0,37, марганца – 0,9-1,2; серы – 0,025; фосфора 0,025), с температурой нагрева под прокатку  $950^{\circ}\text{C}$ , при частотах вращения 30...80 об/мин. Минимальная частота в 30 об/мин обусловлена технологическими возможностями устойчивой работы привода стана, а максимальная – условиями захвата заготовки.

В ходе экспериментальной прокатки анализировались следующие параметры: усилие прокатки, контактное давление в момент захвата и в установившемся режиме прокатки в момент заполнения всех калибров при

пересчете на 1 заход. В качестве измеряемого параметра использовалось значение крутящих моментов зафиксированных с датчиков прокатного двигателя, а затем производился пересчет на остальные параметры с использованием переводных формул, учитывая КПД установки и ранее рассчитанные площади контакта. Результаты приведены в таблицах 6,7.

Таблица 6. Влияние частоты вращения валков на усилие прокатки  $N$  (кН) / контактное давление.  $p$  (МПа) в момент захвата на новых валках для различных диаметров заготовки

Ø Заготовки, мм (клеть)	Усилие прокатки $N$ (кН) / контактное давление. $p$ (МПа) при различной частоте вращения валков $n$ , об/мин				
	$n=30$	$n=40$	$n=50$	$n=60$	$n=80$
60 (ЦКБММ-44)	1,2/15	2,9/36	4,1/51	6,2/77,5	19,2/240
80 (ЦКБММ-44)	1,4/13	4,9/42	7,9/67,7	24,7/212	-
80 (ЦКБММ-45)	1,1/9,7	3,6/28,3	6,3/49,6	22,9/180,5	-
100 (ЦКБММ-45)	1,9/14	4,8/34,9	19,3/140,4	-	-
120 (ЦКБММ-45)	4,3/17,6	22,2/90,8	-	-	-

Таблица 7. Влияние частоты вращения валков на усилие прокатки  $N$  (кН) / контактное давление.  $p$  (МПа) в установившемся режиме на новых валках для различных диаметров заготовки

Ø Заготовки, мм (клеть)	Усилие прокатки $N$ (кН) / контактное давление. $p$ (МПа) при различной частоте вращения валков $n$ , об/мин				
	$n=30$	$n=40$	$n=50$	$n=60$	$n=80$
60 (ЦКБММ-44)	279/46,3	292/48,5	299/49,7	312/51,9	348/57,9
80 (ЦКБММ-44)	352/58	369/61	379/62,5	393/65,6	-
80 (ЦКБММ-45)	222/48,1	235/50,9	244/52,9	254/55,3	-
100 (ЦКБММ-45)	444/42,6	455/43,6	462/45	-	-
120 (ЦКБММ-45)	660/35,5	695/37,3	-	-	-

Изменение частоты вращения валков существенно влияет на контактное давление, а тем самым на повышенный износ валков в момент

захвата заготовки. Наиболее значимо это проявляется на заготовках малого диаметра  $\varnothing 60$ ,  $\varnothing 80$ . В отличие от приведенного выше аналитического метода исследования, где в качестве лимитирующего критерия было выбрано контактное давление  $p=50$  МПа, из полученных экспериментальных данных видно, что оно будет превышать данное значение уже при частоте 50 об/мин в момент захвата почти для всех профилей. Но, в свою очередь, и в устоявшемся режиме значения усилий прокатки и контактного давления значительно превышают расчетные значения, что, очевидно, связано со спецификой текущего состояния стана.

По снятым показаниям видно, что контактное давление в момент захвата превышает рабочее в 4-5 раз. При уменьшении частоты вращения валков для каждого профиля на 25-30% от рабочей частоты, значение контактного давления падает в 2-3 раза. Максимальное влияние частота вращения оказывает на контактное давление при прокатке заготовок меньшего диаметра  $\varnothing 60$  и  $\varnothing 80$  на стане 40-80, в то время как для заготовок  $\varnothing 120$  мм воздействие менее существенно, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только заготовки  $\varnothing 60$  мм для стана (ЦКБММ-44) и  $\varnothing 80$  мм для стана (ЦКБММ-45).

На рисунке 26. показано влияние диаметра заготовки на контактное давление в момент захвата заготовки и в устоявшемся режиме прокатки для заготовок  $\varnothing 60$  мм и  $\varnothing 80$  мм.

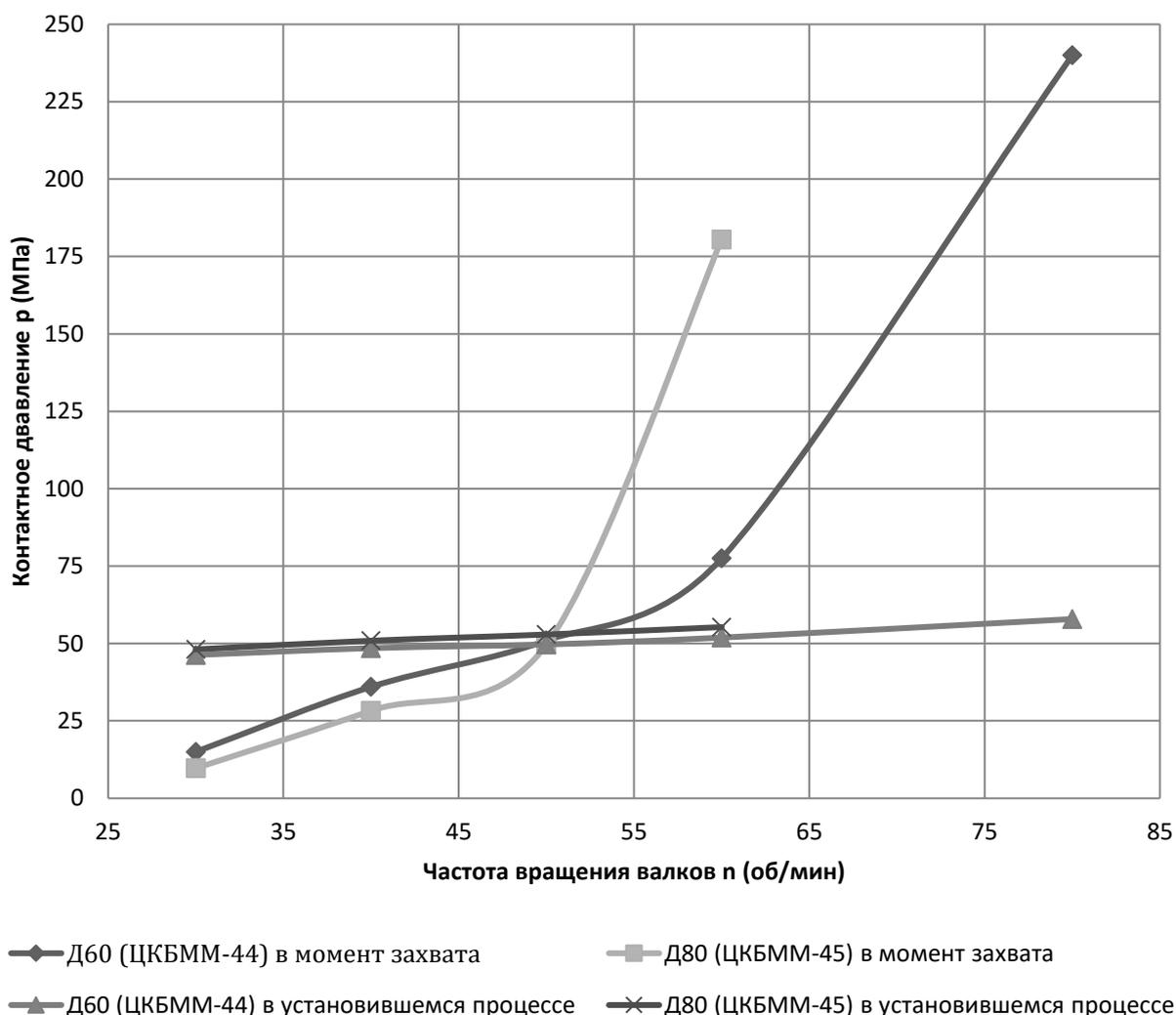


Рисунок 26. Изменение контактного давления в момент захвата заготовки и в установившемся режиме прокатки на новых валках

Полученные зависимости позволяют определить диапазоны и режимы эффективного применения переменной скорости вращения валков на начальной стадии деформирования заготовки. При минимальных частотах вращения валков контактное давление в момент захвата будет ниже, чем при установившемся процессе, поэтому скоростная корректировка режима в момент захвата нецелесообразна. Пересечение графиков для каждого профиля позволяет определить допускаемую частоту вращения на стадии захвата, которая составляет для заготовки  $\varnothing 60$  мм на стане ЦКБММ-44- $n=50$  об/мин, а для заготовки  $\varnothing 80$  мм на стане ЦКБММ-45 - $n=51$  об/мин.

Во время проведения прокатной кампании инструмент деформации испытывает непрерывный износ. До достижения максимально допустимого износа, валки считаются годными, однако оптимальные режимы, рекомендованные выше, изменяются (рисунок 27). На стадии захвата заготовки наблюдается прогрессивный рост контактного давления от частоты вращения, в свою очередь, в установившемся процессе увеличение данного параметра по-прежнему незначительно и практически совпадает с данными установившегося режима для новых валков.

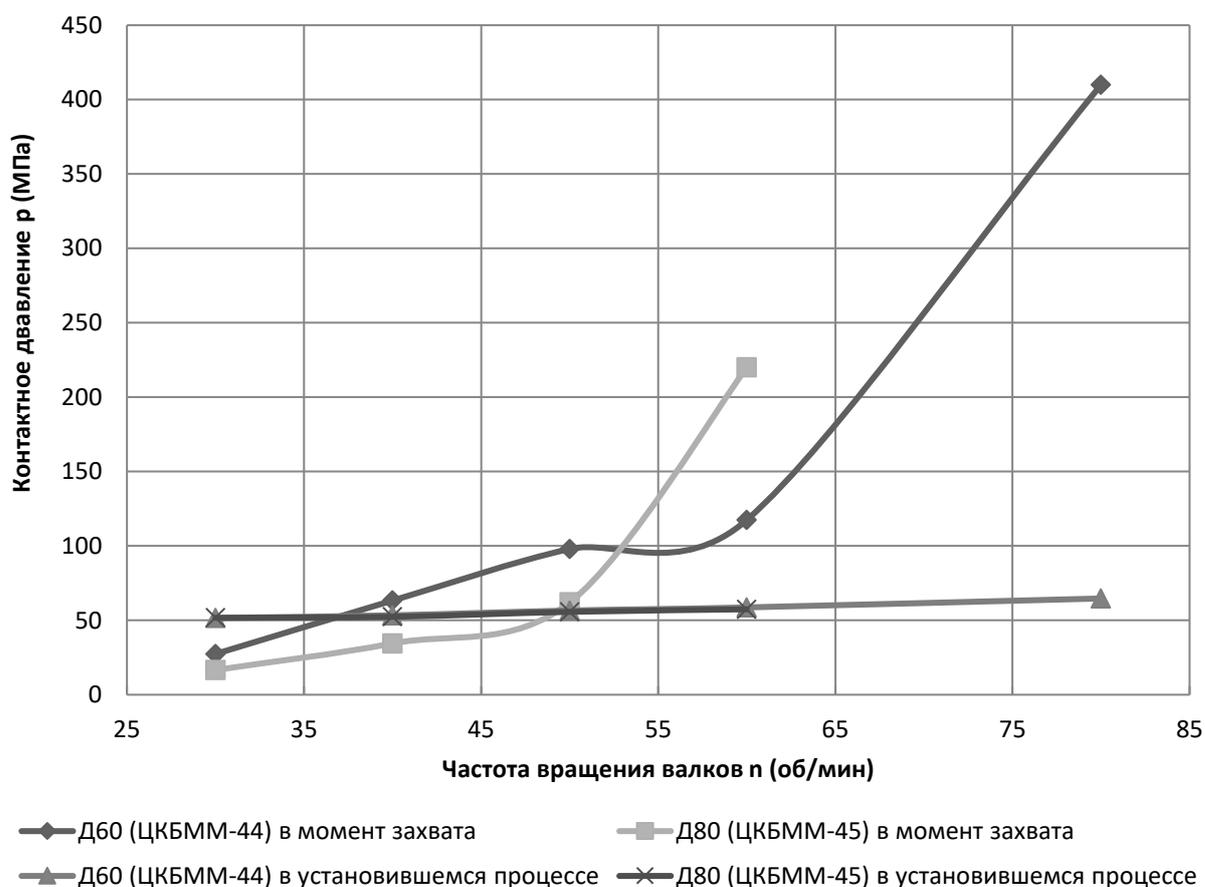


Рисунок 27. Изменение контактного давления в момент захвата заготовки и в установившемся процессе на валках с максимально-допустимым износом

Для валков с максимально-допустимым износом (см. рисунок 27), на стане ЦКБММ-44 для заготовки  $\varnothing 60$  мм, частоту вращения следует уменьшить до значений, не превышающих 40 об/мин, а затем, после получения вращения заготовки, произвести ускорение валков до рабочей

частоты - 80 об/мин. Для заготовки  $\varnothing 80$  мм на стане ЦКБММ-45 оптимальным будет захват на частоте вращения валков 50 об/мин, данное значение практически не меняется с допустимым значением частоты вращения при захвате на новых валках данного профиля [87].

После того, как было выяснено, что наиболее критично условие захвата для заготовки  $\varnothing 60$  мм, был проведен дополнительно еще ряд опытов для выявления оптимальной функции приращения частоты вращения. В данном случае, параметры снимались в момент захвата, после одного оборота валка и после полного заполнения калибра

Экспериментальные режимы деформации предусматривают линейное и квадратичное приращение частоты вращения. Результаты в виде графического изображения характеристик приведены на рисунке 28. Согласно графикам видно, что среднее давление при захвате заготовки не превышает максимального при полном заполнении калибра.

При определении энергосиловых параметров, используется формула Целикова [18, 88] для определения средней скорости деформации, справедливая при постоянной частоте вращения валков в общем виде:

$$U_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b U_x dx, \quad (6)$$

где  $U_x$  – скорость деформации элементарной точки,

$b$  – условная ширина контакта металла с валком

После подстановки известных значений примет вид (6):

$$U_x = \frac{\pi n_b A_0 - \rho}{30} \frac{x}{\rho \sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (7)$$

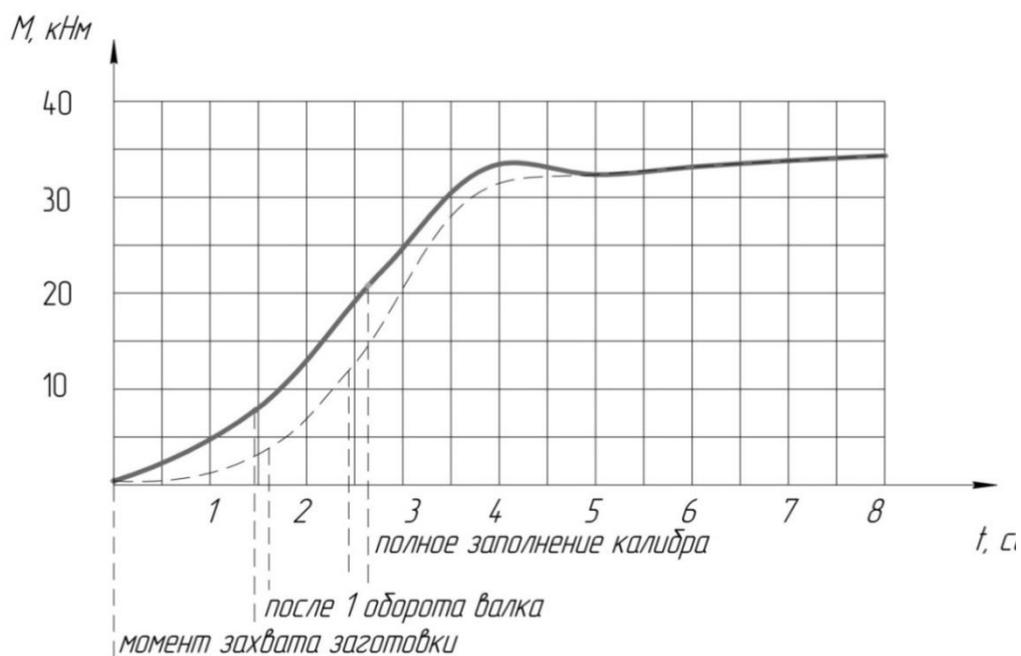
где  $n_b$  – частота вращения валка,

$r$  – условный радиус (расстояние от оси заготовки до элементарной точки приложения).

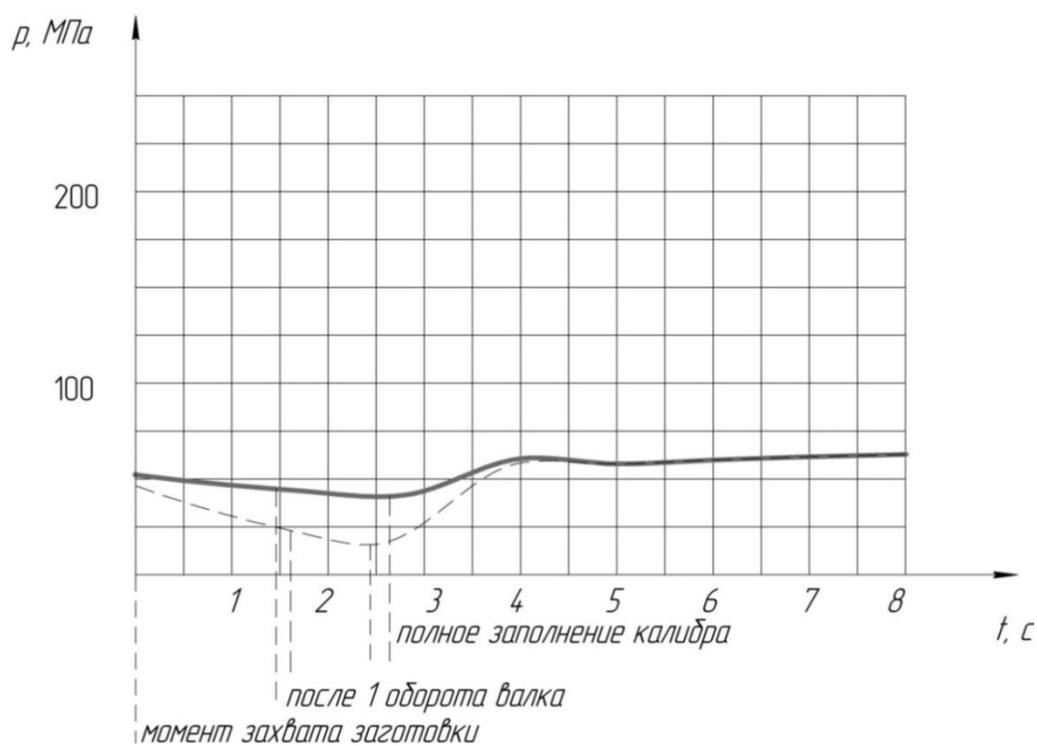
$A_0$  – межосевое расстояние (ось валка и ось заготовки)

$\rho$  – радиус заготовки

$x$  – точка приложения в координате абсцисс.



а.



б.

Рисунок 28. Эмпирические характеристики при переменной частоте вращения валков по линейному и по квадратичному закону

Штриховая линия значения для квадратичной характеристики.

Сплошная линия для линейной характеристики.

Для переменной частоты вращения по линейному закону формулу (7) преобразуем в следующий вид, средняя скорость деформации (по Целикову) при этом составит:

$$U_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y A_0 - \rho}{30 \rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy. \quad (8)$$

Для переменной частоты вращения по квадратичному закону, средняя скорость деформации (по Целикову) составит:

$$U_{cp} = \frac{1}{bn_e} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y^2 A_0 - \rho}{30 \rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy, \quad (9)$$

где  $A_0$  межосевое расстояние валка и заготовки.

Уравнения (8), (9) в дальнейшем можно использовать для определения скорости деформации при переменной частоте вращения валков и дальнейшего определения энергосиловых параметров в процессе разгона.

Квадратичный закон изменения частоты вращения можно применять для условий, когда время пауз между заготовками ограничено, что позволяет сократить время достижения номинальной частоты вращения до 2 сек при том же эффекте [89,90].

Техническое решение данной задачи в условиях стана возможно осуществить установкой тиристорного преобразователя с автоматической регулировкой частоты вращения валков при помощи записанного логического кода, записанного в память [91].

Для реализации поставленной задачи использовался алгоритм, написанный на языке функциональных блоков в среде ДСС тиристорного преобразователя Sinamics DCM (рисунок 29).

Для определения наличия заготовки в клети использовался сигнал, отражающий нагрузку прокатного двигателя. До введения заготовки в клеть, скорость вращения валков составляет 75% от номинальной скорости проката (в соответствии с рекомендованными параметрами, определенными по рисунку 26). После появления нагрузки, через 2 секунды вращение валков

увеличивается до номинальной скорости. Для исключения вероятности срабатывания функции во время штатного разгона привода, используется блокировка по производной от заданной скорости с задатчика интенсивности (RAMP). После снижения нагрузки скорость вращения валков автоматически снижается до 75% от номинальной скорости.

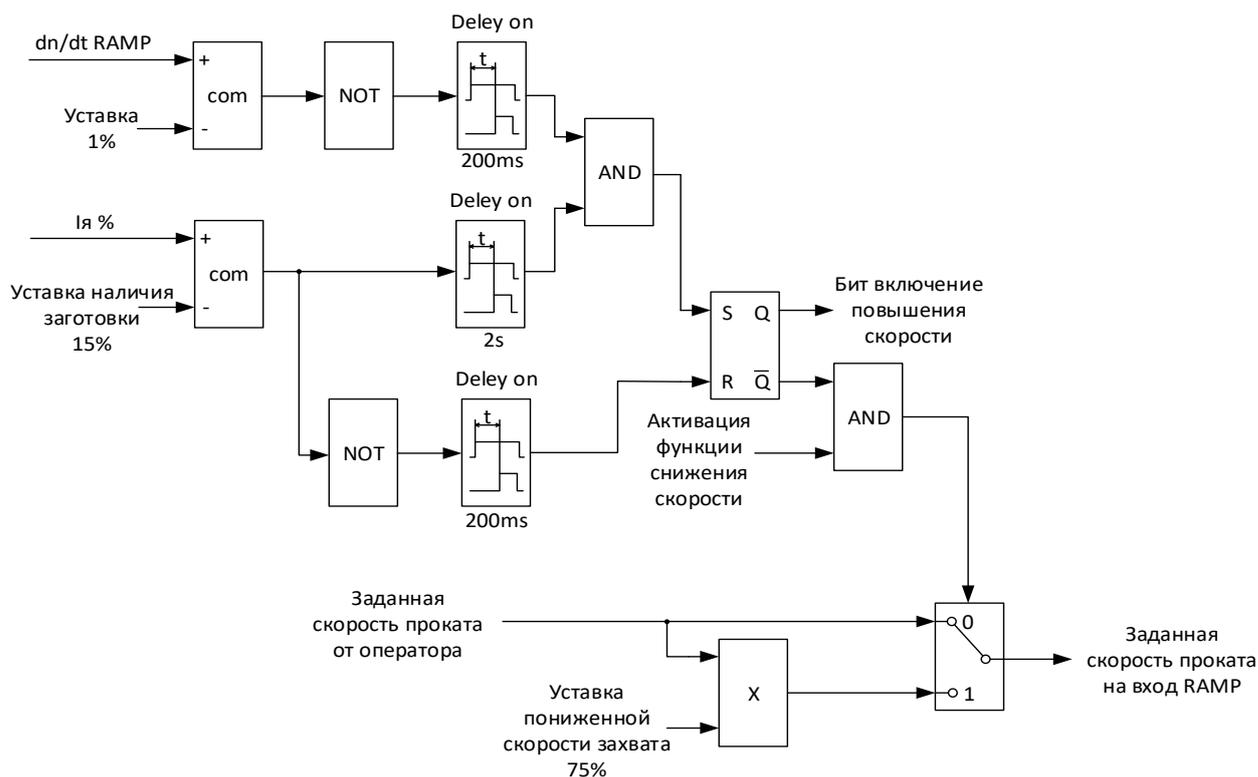
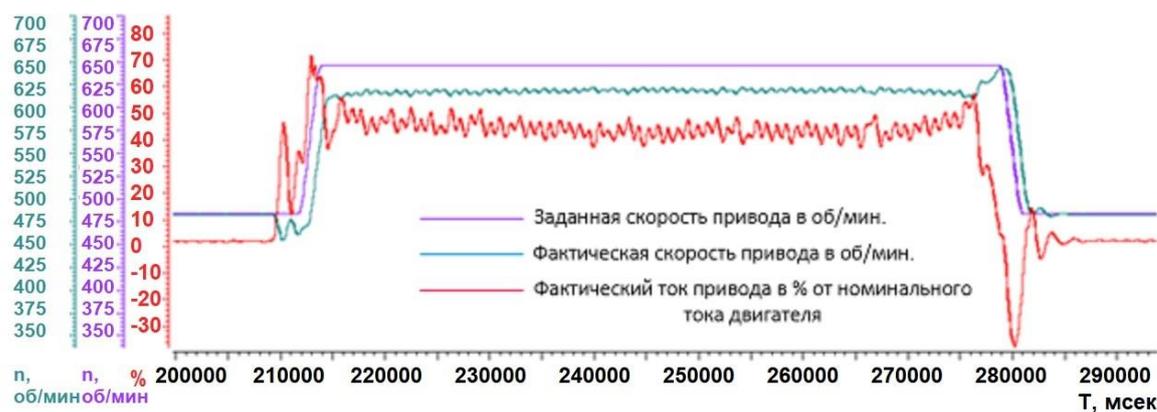


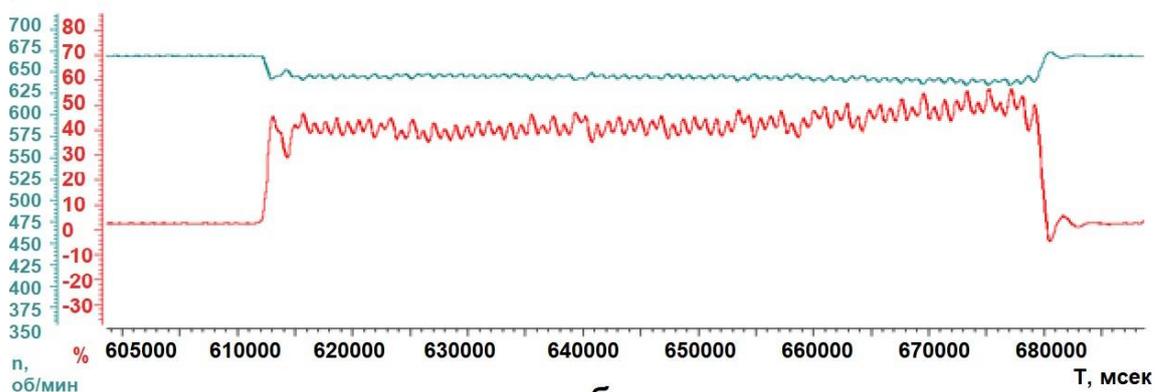
Рисунок 29. Алгоритм снижения скорости на момент захвата заготовки

Алгоритм успешно опробован на наиболее тяжелом профиле проката шара условным диаметром 120 мм и показал свою работоспособность при прокате с минимальным временным интервалом между заготовками. Осциллограммы, подтверждающие работоспособность алгоритма изображены на рисунке 30(а). Для сравнения на рисунке 30(б) приведена тахограмма и нагрузочная диаграмма без использования данного режима.

Увеличение времени проката за счет снижения окружной скорости валков не превышает 1% от времени цикла, что не ограничивает общую производительность линии.



а.



б.

Рисунок 30. Осциллограмма и нагрузочная диаграмма при прокатке шара условным диаметром 120 мм на стане 80-125:

- а. при автоматической регулировке частоты на захвате;
- б. без использования функции захвата на пониженной скорости.

Согласно рисунку 30 (а), нагрузка прокатного двигателя синхронизирована с оборотами двигателя, что приводит к снижению пульсации (выравниванию синусоидальности) нагрузки и снижению общей нагрузки, особенно в зоне захвата заготовки в отличие от режима работы валков с постоянной частотой вращения.

Таким образом, исследование влияния частоты вращения валков при поперечно-винтовой прокатке на контактное давление показало, что максимальное влияние она оказывает в момент захвата заготовки. В свою очередь, повышенное контактное давление, учитывая относительно малое пятно контакта заготовки и реборды вала в месте захвата, приводит к разрушению реборд валков на заходе и к преждевременному выходу из строя инструмента деформации.

Аналитическое исследование позволило установить оптимальные частоты вращения в момент захвата заготовки. Для заготовки Ø60 мм, допустимая частота вращения валков составит 71 об/мин и, соответственно, для Ø80 мм — 72 об/мин, для Ø100 мм — 65 об/мин, для Ø120 мм — 63 об/мин. Экспериментальное исследование процесса прокатки, проведенное за весь жизненный цикл валка (от нового до достигшего предельно допустимого износа), подтвердило аналитические расчеты с учетом корректировок, связанных с текущим состоянием оборудования. Наиболее существенное снижение частоты вращения валков в момент захвата необходимо для заготовок меньшего диаметра. Причем по мере развития процессов износа инструмента деформации требуется еще большее снижение частоты вращения (до 40% от первоначального значения). Например, для заготовки Ø60 мм частота вращения на предельно изношенных валках не должна превышать 40 об/мин.

Проведенные исследования обосновали использование режимов прокатки с переменной частотой вращения валков, т. е. снижение частоты вращения до допустимой в момент захвата заготовки и постепенный выход на рабочую частоту в установившемся режиме. Применение этого метода позволяет уменьшить нагрузку на реборду в месте захвата и, тем самым, увеличить ресурс службы валков.

В условиях, когда время пауз между заготовками ограничено, возможно использование квадратичной зависимости увеличения частоты вращения валков, при которой время пауз снизится до 2 секунд при сохранении ожидаемого эффекта от снижения контактного давления на реборду.

На основании аналитических и экспериментальных исследований на языке функциональных блоков в среде DCC тиристорного преобразователя Sinamics DCM был создан и внедрен управляющий алгоритм для снижения скорости валка в момент захвата заготовки для стана 80-125 (Приложение 2 Акт от 1 августа 2020 об использовании изобретения №2723342 от 09.06.2020г.)

### 2.3. Способ повышения ресурса проводок за счет возможности увеличения подрезки

Ширина рабочая поверхности проводки, имеющая контакт с заготовкой, за счет сведения валков незначительна. Например, для производства шара условным диаметром 120 мм она составляет 15-20 мм, в зависимости от применяемой калибровки и размеров валков (рисунок 31), а для шара  $\varnothing 60$  мм, при диаметре валков 700 мм, для некоторых калибровок, может составлять в самой узкой части 3 мм. Условия работы, описанные в п 2.1, наряду с малой площадью контактной поверхности, приводят к быстрому и значительному износу. Исходя из опыта, подрезка одного из валков осуществляется с целью создания разнополярности напряжения в зоне скрещивания валков, с дальнейшим закручиванием шара в оси, отличающейся от оси прокатки и осуществлением отделения перемычки. Однако величина подрезки валка не регламентирована, и возможность его максимальной подрезки требует научного обоснования. В качестве решения данной задачи нами была обоснована возможность максимальной подрезки валка (рисунок 32).



Рисунок 31. Проводки шаропрокатного стана для производства:

- а. – шара условным диаметром 120 мм; б.- комплект проводок для производства шара условным диаметром 60 мм

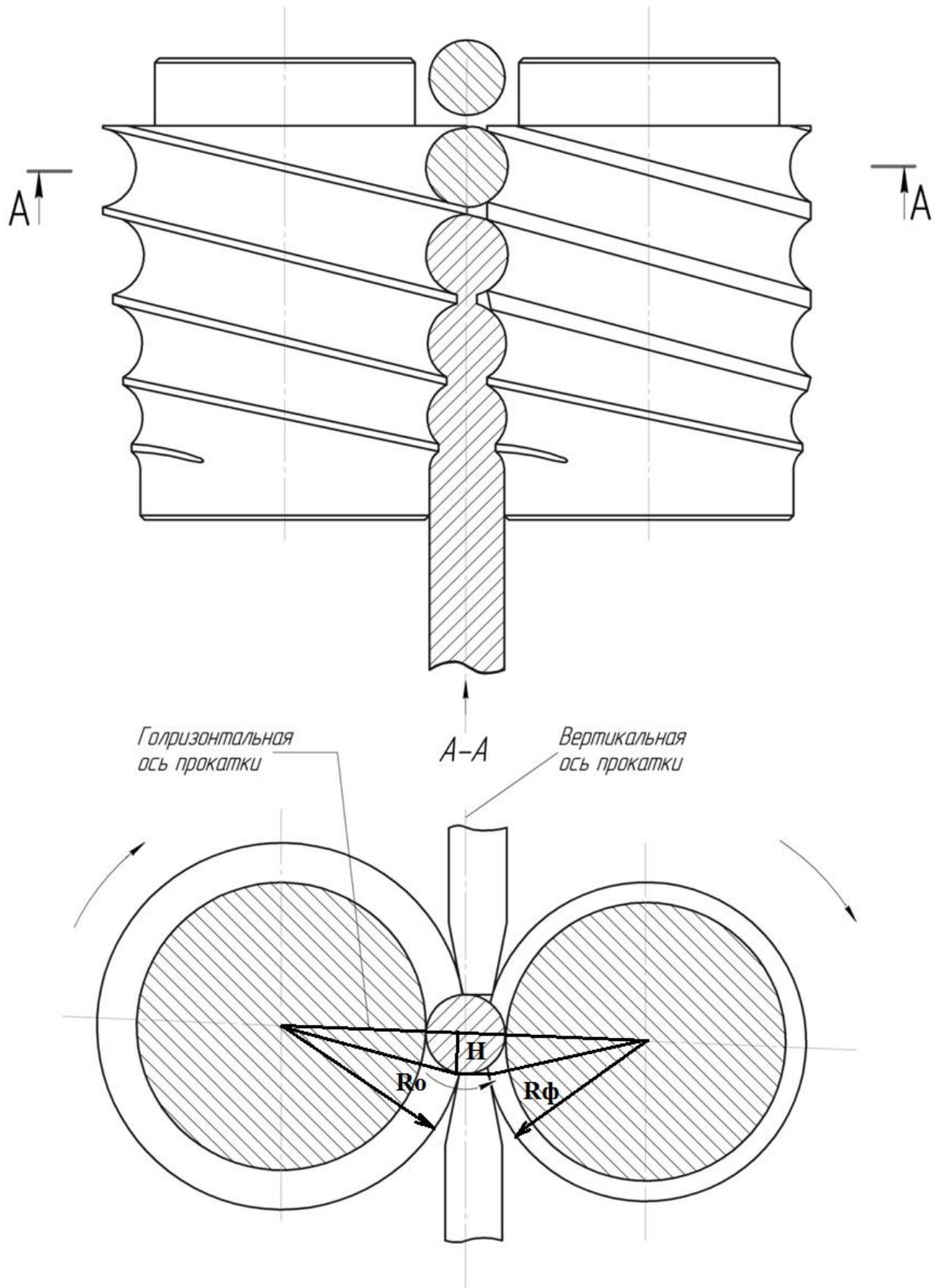


Рисунок 32. Схема прокатки с использованием асимметричных валков

Согласно предложенной схеме калибровки, сначала происходит формирование шара за счет обоих валков. Однако, производить подрезку валка в зоне захвата не допускается, т.к. в данной зоне валок испытывает наибольшие контактные давления, приводящие к интенсивному износу и разрушению, что было доказано в п.2.1. После осуществления захвата заготовки и формирования части получаемого профиля, один валок выводится из работы за счет подрезанной реборды и служит только в качестве опорной контактной поверхности. Остаточное формирование шара происходит за счет одного валка, высота реборды которого увеличивается и продолжает врезаться в заготовку. В итоге происходит отделение и дальнейшее закручивание шара за счет асимметричности нагрузок вызываемых заданной геометрией калибра. При прокатке несферических профилей, для отделения изделий чаще всего используют конструкцию отрезного валка, у которого реборды пересекают ось прокатки. В связи с этим был проведен ряд опытов с возможностью подрезки реборды валка на различную величину, и получены устойчивые режимы прокатки.

Для определения ширины рабочей части проводки  $B_n$  предложена формула (10), выводимая геометрически - по правилу трапеции (рисунок 32) исходя из диаметров отрезного и формирующего валка:

$$B_n = A - \sqrt{R_o^2 - H^2} - \sqrt{R_\phi^2 - H^2}, \quad (10)$$

где

$B_n$  – ширина рабочей части проводки,

$A$  – межосевое расстояние валков,

$R_o$  – радиус отрезного валка,

$R_\phi$  – радиус формирующего валка,

$H$  – расстояние между осью прокатки и рабочей частью проводки

(при настройке стана с давлением на верхнюю проводку)

$H = d_{uw}/2$  - для верхней проводки

$H = (d_{uw}/2) + 2 \dots 4$  мм – для нижней проводки.

Максимальное уменьшение реборды было произведено на валках для прокатки шаров 120 мм, где диаметр отрезного валка составил 692 мм, а формирующего 674 мм, что позволило использовать проводку с шириной рабочей части 27 мм.

Итак, установлено, что износ направляющих проводок зависит от ширины их рабочей поверхности. Уширение рабочей поверхности возможно при увеличении подрезки одного из валков.

Апробация аналитической модели произведена в условиях стана 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК». Увеличение ширины рабочей части проводок, при прокатке шаров условным диаметром 60 мм, Ø80 мм, Ø100 мм, Ø120 мм, до максимально возможных значений 9,5 мм, 14,5 мм, 16,5 мм и 27 мм, соответственно, повысило их ресурс (Приложение 2 п.№2. Акта О результатах внедрения инициатив на участке ШПС от 23.09.2020г.).

## 2.4. Выводы

Одной из малоизученных проблем ПВП является стойкость прокатного инструмента. В данной главе был исследован износ валков и проводок, для увеличения ресурса валков предложено изменение скоростного режима работы валков, а для проводок увеличение рабочей поверхности за счет максимально-допустимой подрезки валков.

На шаропрокатных валках доминирующим является механическое изнашивание (усталостное и абразивное), наиболее подвержены износу реборды валков. Наблюдается ярко выраженная дифференциация износа по длине бочки шаропрокатного валка. Зона наиболее интенсивного износа шаропрокатных валков зависит от толщины реборды. Наиболее подвержены износу две области валков: зона захвата заготовки и зона отделения перемычки (зона скрещивания валков), в которых износ достигает предельных значений в первую очередь.

Установлено, что степень износа как для валков, так и для направляющих проводок, интенсивно возрастает по мере самого износа. Предельный ресурс работы валков за одну кампанию необходимо определять по фактическому уменьшению высоты реборд в критических зонах, а не по среднестатистическому ресурсу, что в целом устранил появление недокатов и увеличит полный ресурс валков.

Как аналитически, так и опытно определено влияние частоты вращения валков при поперечно-винтовой прокатке на контактное давление, установлено, что максимальное оно оказывает в момент захвата заготовки. Определены оптимальные частоты вращения в момент захвата заготовки. Для заготовки  $\varnothing 60$  мм допустимая частота вращения валков составит 71 об/мин и, соответственно, для  $\varnothing 80$  мм — 72 об/мин, для  $\varnothing 100$  мм — 65 об/мин, для  $\varnothing 120$  мм — 63 об/мин. Наиболее существенное снижение частоты вращения валков в момент захвата необходимо для заготовок меньшего диаметра. Причем по мере развития процессов износа инструмента деформации требуется еще большее снижение частоты вращения (до 40% от первоначального значения).

Было предложено и обосновано использование режимов прокатки с переменной частотой вращения валков, т. е. снижение частоты вращения до допустимой в момент захвата заготовки и постепенный выход на рабочую частоту в установившемся режиме. Применение данных режимов позволяет уменьшить нагрузку на реборду в месте захвата и, тем самым, увеличить ресурс службы валков. Возможно использование квадратичной зависимости увеличения частоты вращения валков, при которой время пауз снизится до 2 секунд при сохранении ожидаемого эффекта от снижения контактного давления на реборду.

Установлено, что износ направляющих проводок зависит от ширины их рабочей поверхности. Уширение рабочей поверхности возможно при увеличении подрезки одного из валков. Апробация аналитической модели произведена в условиях стана 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК». Увеличение

ширины рабочей части проводок, при прокатке шаров условным диаметром 60 мм, Ø80 мм, Ø100 мм, Ø120 мм, до максимально возможных значений 9,5 мм, 14,5 мм, 16,5 мм и 27 мм, соответственно, повысило их ресурс

### 3. РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ШАРОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

#### 3.1. Непрерывно изменяющиеся параметры в калибровках шаропрокатных валков

За последние два десятилетия, с появлением многофункциональных пятикоординатных обрабатывающих центров, появилась возможность получения наружных профилей любой сложности, в связи с этим многие процессы трансформировались и стали ориентироваться на применение деталей с непрерывно-изменяющимися параметрами. Целью применения непрерывно-изменяющихся параметров в шаропрокатных валках является: получение плавного режима работы, снижение суммарных нагрузок, увеличение ресурса валков и работоспособности всего стана, также возможность получения геометрии наружного профиля валка любой конструкции с обеспечением равномерности обжатия шара по поверхности в процессе формирования.

Среди всех переменных параметров элементов профиля шаропрокатных валков, можно выделить основные: шаг винтовой линии  $T_i$ , высота реборд  $H_i$ , а также вспомогательные: толщина реборд  $B_i$  и развалка калибра  $S_i$  (Рисунок 33). Рассмотрим детально каждый из параметров и их изменение в зависимости от угла положения по длине винтовой линии.

Первым из параметров рассмотрим толщину реборды  $B_i$ . В главе 2 изучены два возможных конструктивных случая, когда по направлению движения заготовки вдоль валков толщина реборды: 1 - уменьшается, 2 - увеличивается. В первом случае отмечается уменьшение износа валков в зоне захвата заготовки, во втором – в точке их скрещивания, однако в обоих случаях наблюдается существенная разница обжатий по поверхности на шаре, что приводит к интенсивному износу валков. Судя по данным работ

[18, 48, 51, 77], толщина реборды зависит от параметров шага винтовой канавки  $T_i$  и развалки калибров  $S_i$  (рисунок 33).

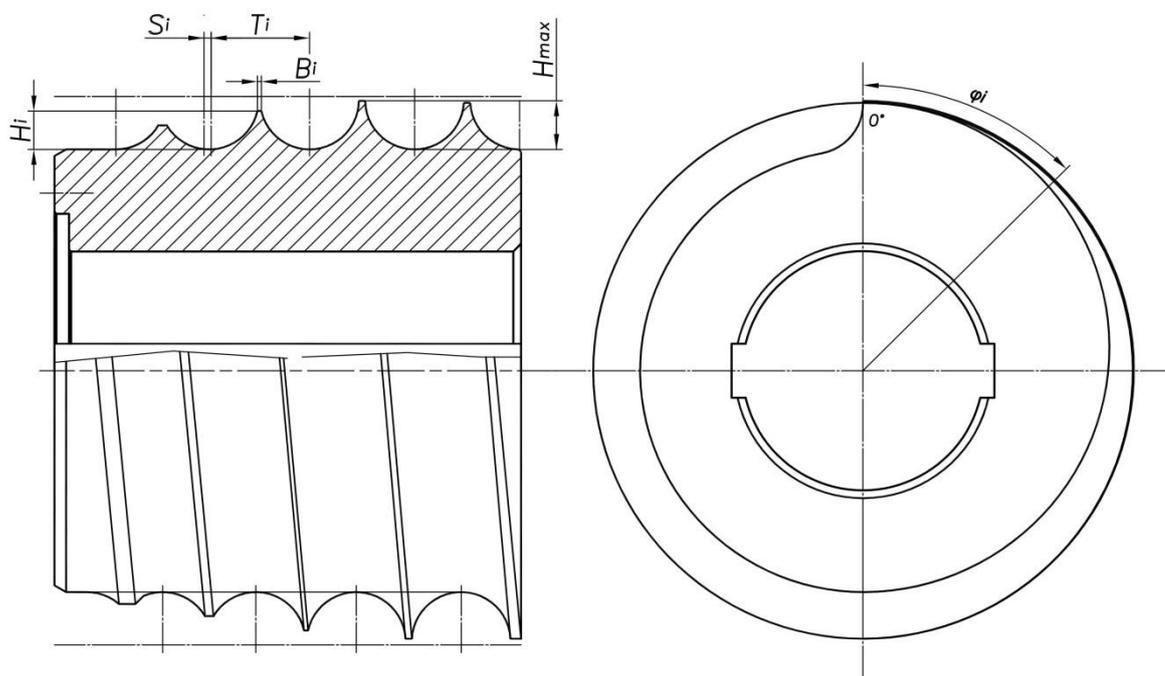


Рисунок 33. Параметры шаропрокатного вала

$T_i$  – шаг винтовой линии;

$B_i$  – толщина реборды;

$H_i$  – высота реборды;

$H_{max}$  – максимальная высота реборды (в конце формирующего участка)

$S_i$  – величина развалки калибра;

$\phi_i$  – угол положения по длине винтовой линии от начала захода реборды,

$\phi_\phi$  – угол, при котором заканчивается формирующий участок (при котором реборда имеет максимальную высоту  $H_{max}$ ) [93-95].

Как было установлено ранее из работ [18, 48], рациональной конструкцией можно считать такую, в которой после зоны захвата заготовки толщина реборды незначительно уменьшается, а затем, по мере продвижения заготовки вдоль валков, увеличивается, создавая благоприятные условия для отделения перемычки от готового шара. Также реборды должны иметь

достаточную прочность за счет рациональной ширины в зонах захвата заготовки и скрещивания валков.

Следующим из изменяющихся параметров рассмотрим высоту реборды  $H_i$ . Подъем реборды  $\Delta H$  характеризуется увеличением её высоты на начальном (формирующем) участке валка - это необходимо для обеспечения постепенного врезания в заготовку. Функция, определяющая прирост высоты – так называемый закон подъема реборды, может иметь линейный, параболический или гиперболический характер [96-99]. В настоящий момент наибольшее применение получил линейный закон. В случае применения нелинейного закона (в качестве частного примера на рисунке 33 изображен пример параболического закона роста реборды  $\Delta H$ ), ширина реборды будет неравномерно «плавать», что приведет к неравномерности прилегания металла к валку и нестабильности процесса прокатки.

Следующим переменным параметром будет рассмотрен шаг винтовой линии  $T_i$ .

В работах [18, 51, 52], где была описана модель с дискретно-изменяющимся шагом, определение шага винтовой линии характеризуется постоянством объема металла, ограниченного перемычками в предыдущем и последующем витке через каждые  $\varphi_i=180^\circ$ , при этом определяется величина развалки для подрезки реборды. Так как при применении дискретно-изменяющегося шага выполнение условия постоянства объема невозможно, применяются следующие допущения:

- условие постоянного прилегания реборды к металлу для обеспечения непрерывности обжатия и создание трения металла в валках;

- через каждые  $\varphi_i=180^\circ$  шаг увеличивается на величину, обеспечивающую получение объема металла, эквивалентного предыдущему положению валка.

При использовании токарно-винторезных станков, теоретический шаг через каждый угол  $\varphi_i=180^\circ$  округляется до ближайшего реального значения шага, которое возможно получить при подборе пары сменных шестерен.

После подбора шагов производится расчет на условие переполнения объема металлом, при этом, если переполнение в каждом соседних  $\varphi_i=180^\circ$  положения валка превышает 4-7% от объема шара, задается промежуточное значение через каждые  $\varphi_i=90^\circ$  оборота валка для выполнения данного условия.

При применении калибровок с дискретно-изменяющимся шагом, ступенчатость создает динамические переходы от одного шага к другому и неравномерность контактных давлений на протяжении всего процесса прокатки.

Применение непрерывно-изменяющегося шага позволяет исключить переполнение калибров, поэтому в работах [22,24,62,77] был предложен способ получения непрерывных гладких кривых. При такой калибровке для получения кривой шаг может определяться через любой произвольно минимальный угол  $\varphi_i$ , однако на практике чаще всего используется дискретность через каждые  $\varphi_i=15^\circ$ , а между данными углами кривая изменения шага сглаживается.

Дельнейшим развитием модели является аналитическое определение функций изменения шага. Используя данную математическую модель, станет возможным нахождение шага на любом произвольном угле  $\varphi_i$ .

В данном исследовании предлагается вывести функции изменения шага, используя которые возможно нахождение шага на любом произвольном угле  $\varphi_i$ . Затем необходимо изучить истинность получения кривой и в дальнейшем использовать данные функции для построения калибровки с непрерывно меняющимся шагом.

Оставшийся параметр – величина развалки калибра  $S_i$ , также будет изменяться в зависимости от условия сохранения постоянства объема и примененного в соответствии с ней параметра на произвольном угле  $\varphi_i$ . Также как и для определения шага, необходимо определение истинного значения  $S_i$  и характера кривой, определяющей изменение развалки в зависимости от угла положения по длине винтовой линии  $\varphi_i$ .

Подводя итоги по данному подразделу, можно сказать, что:

- при калибровке шаропрокатных валков применяются четыре изменяющихся параметра ( $T_i$ ,  $H_i$ ,  $B_i$  и  $S_i$ ). Для роста реборды  $\Delta H$  наиболее приемлемым будет линейный закон, в силу возможности изготовления валков с отсутствием волнообразности реборды, толщина реборды  $B$  имеет подчиненный характер, при этом наиболее эффективным будет её незначительное увеличение в зоне захвата и зоне отделения перемычки. Для параметров изменения  $\Delta H$  шага и развалки калибра  $\Delta S$  более приемлемо использование непрерывно-изменяющихся параметров.
- для  $\Delta H$  и  $\Delta S$  требуется вывести функции изменения шага, используя которые возможно нахождение шага на любом произвольном угле  $\varphi_i$ .

### **3.2. Определение функций непрерывно изменяющегося шага для шаропрокатных валков**

В качестве перспективной технологии, предлагается исследовать зависимость изменения шага при выполнении условия полного заполнения калибров и сохранения постоянства секундных объемов для валков с постоянной и с переменной толщиной реборды.

Для полного заполнения калибра необходимо, чтобы в процессе формирования, металл заготовки непрерывно прилегал к реборде. Это возможно при условии, что элементарный объем металла, вытесненный из перемычки ( $dV_{na}$ ), всегда равен или несколько меньше элементарного приращения объема полусфер шара ( $dV_{ша}$ ). [51]

$$k = \frac{|dV_{ша}|}{|dV_{на}|}, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент натяжения в перемычке, компенсирующий неточности изготовления валков и настройки стана.

При значениях  $k > 1$ , будет происходить вытяжка металла с возможным образованием пустот между заготовкой и ребордой, что в дальнейшем

образует накат (плену), а при  $k < 1$  – будет происходить натяжение перемычки, что может привести к разрыву заготовки в процессе прокатки.

Оптимальным считается сохранение постоянства объема и сохранение коэффициента  $k=1$  по всей длине валка.

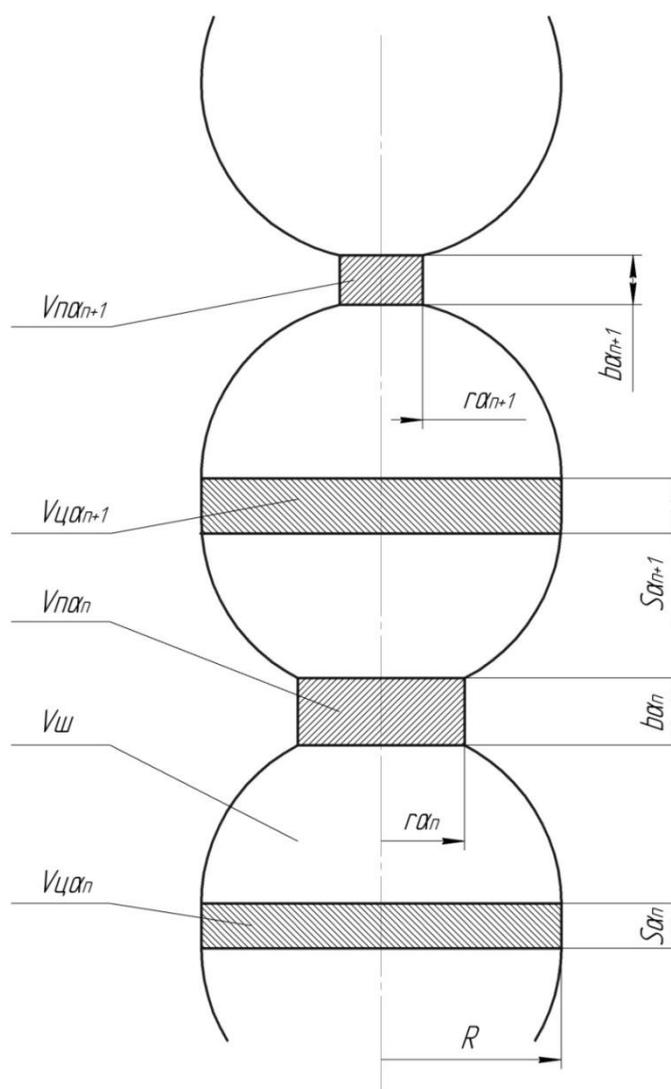


Рисунок 34. Сечение заготовки во время прокатки с развалкой калибра

Определим функцию переменной изменения шага.

Для расчетной модели примем схему калибровки с использованием развалки калибра (рисунок 34), а коэффициент натяжения в перемычке формула (11)  $k=1$ , тогда объем, вытесненный из перемычки, будет равен объему приращения полусфер (включая приращение цилиндрической части). Выводим формулы для нахождения объемов элементарных фигур.

$$V_{n\alpha} = \pi r_{\alpha}^2 b_{\alpha}. \quad (12)$$

$$V_{ш\alpha} = \frac{3}{4} \pi R^3 - V_{ш.c\alpha}, \quad (13)$$

где  $V_{ш.c.}$  - объем шарового сегмента, усеченного перемычкой.

$$V_{ш.c\alpha} = \left( R - \sqrt{R^2 - r_{\alpha}^2} \right)^2 \left( R - \frac{(R - \sqrt{R^2 - r_{\alpha}^2})}{3} \right). \quad (14)$$

Подставив формулу (14) в выражение (13), и упростив, получим:

$$V_{ш\alpha} = \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha}^2 \left( R - \frac{r_{\alpha}}{3} \right). \quad (15)$$

$$V_{ц\alpha} = \pi R^2 s_{\alpha}, \quad (16)$$

где  $V_{n\alpha}$ ,  $V_{ш\alpha}$ ,  $V_{ц\alpha}$  – объем перемычки, объем полусфер с усеченными сегментами и объем шара в определенный момент.

Сумма данных объемов равна в любой момент прокатки.

$$\sum V = V_{n\alpha} + V_{ш\alpha} + V_{ц\alpha} = const. \quad (17)$$

Рассмотрев 2 произвольных положения получим:

$$V_{n\alpha n} + V_{ш\alpha n} + V_{ц\alpha n} - V_{n\alpha n+1} - V_{ш\alpha n+1} - V_{ц\alpha n+1} = 0. \quad (18)$$

Далее в качестве расчетных моделей рассмотрим два варианта калибровок, при условии, что весь металл идет в вытяжку:

В первом случае принимаем, что толщина реборды по всей длине калибра постоянна и производим расчет калибровки:

$$\begin{aligned} & \pi r_{\alpha n}^2 b_{\alpha} + \left( \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n}^2 \left( R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) + \pi R^2 s_{\alpha n} - \pi r_{\alpha n+1}^2 b_{\alpha} \\ & - \left( \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n+1}^2 \left( R - \frac{r_{\alpha n+1}}{3} \right) - r_{\alpha n}^2 \left( R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) - \pi R^2 s_{\alpha n+1} \\ & = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Разница развалки через один шаг будет определяться  $\Delta S$

$$\Delta S = s_{\alpha n+1} - s_{\alpha n}. \quad (20)$$

Выразив из уравнения (19) параметры развалки, и упростив, получим:

$$\Delta S = \frac{\pi b_{\alpha} (r_{\alpha n}^2 - r_{\alpha n+1}^2) + r_{\alpha n+1}^2 \left( R - \frac{r_{\alpha n+1}}{3} \right)}{\pi R^2}. \quad (21)$$

Шаг определяем по следующей формуле:

$$t_{\alpha} = T_{осн} - \frac{\alpha_{форм}}{\Delta\alpha} \Delta S, \quad (22)$$

где  $\alpha_{форм}$  – угол формирующей части валка.

$\Delta\alpha$  – угол, соответствующий конкретному расчетному положению валка, для которого производим расчет шага.

Формула (22) справедлива для нахождения шага при угле  $0 < \Delta\alpha < \alpha_{форм}$ .

Для определения функции изменения шага возьмем весь формирующий участок, тогда  $\alpha_{форм} / \Delta\alpha = 1$ ,  $r_{ан} = R$  – как начало формирования шара, а  $r_{ан+1} = dx(d\alpha)$ , как переменный показатель изменения радиуса перемычки, зависящий от угла его расположения, находящуюся в пределах  $0 < r_{ан+1} < R$ , получим зависимую функцию изменения шага.

$$\Delta t_{\alpha} = T_{осн} - \int_R^0 \frac{\pi b_{\alpha} (R^2 - x^2) + x^2 \left( R - \frac{x}{3} \right)}{\pi R^2} dx. \quad (23)$$

В качестве второго варианта примем, что толщина реборды увеличивается по мере заполнения калибра по закону подъема реборды:

$$\begin{aligned} & \pi r_{ан}^2 b_{ан} + \left( \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{ан}^2 \left( R - \frac{r_{ан}}{3} \right) \right) + \pi R^2 s_{ан} - \pi r_{ан+1}^2 b_{ан+1} \\ & - \left( \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{ан+1}^2 \left( R - \frac{r_{ан+1}}{3} \right) - r_{ан}^2 \left( R - \frac{r_{ан}}{3} \right) \right) - \pi R^2 s_{ан+1} \\ & = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\Delta S = \frac{\pi r_{ан}^2 b_{ан} - \pi r_{ан+1}^2 b_{ан+1} + r_{ан+1}^2 \left( R - \frac{r_{ан}}{3} \right)}{\pi R^2}. \quad (25)$$

Согласно условию по которому изменение толщины реборды имеет линейный характер и прямо пропорционально закону роста реборды, выводим следующее соответствие:

$$\Delta b_{\alpha} = \frac{b_{ан+1}}{b_{ан}} = \frac{\alpha_{н+1}}{\alpha_n} = \frac{r_{ан}}{r_{ан+1}}. \quad (26)$$

Выражаем  $b_{ан+1}$  через радиус реборды

$$b_{an+1} = \frac{r_{an} b_{an}}{r_{an+1}}. \quad (27)$$

Из полученных условий аналогично для первого случая  $0 < \Delta\alpha < \alpha_{\text{форм}}$ ,  $r_{an} = R$ ,  $r_{an+1} = dx$  и интегрируем также в пределах  $0 < r_{an+1} < R$ , используя формулу (22), подставляем условие вытяжки по формуле (25) и толщину реборды по формуле (27), получим.

$$\Delta t_{\alpha} = T_{\text{осн}} - \int_R^0 \frac{\pi R b_{an} (1-x) + x^2 \left(R - \frac{x}{3}\right)}{\pi R^2} dx. \quad (28)$$

Используя формулы (23, 28) по методике (приложение 1), возможно определить теоретический шаг на любом угле поворота валков для калибровки с постоянной или переменной шириной реборды при непрерывно меняющемся шаге [100].

Оба уравнения представляют собой характеристическое уравнение кривой 2-ого порядка по типу  $y^2 = f(ax^2 + bx + c)$ . В связи с чем, можно предположить, что для определения истинности данной кривой применима теорема единственности кривых второго порядка: «Кривая второго порядка вполне определяется пятью своими точками, если никакие четыре из них не лежат на одной прямой, при этом кривая, заданная пятью точками вырождается в том и только в том случае, когда три из заданных точек лежат на одной прямой» [101]. Исходя из этого, допускаем нахождение 5 произвольных точек из исходного уравнения.

Таким образом:

- аналитически получены уравнения непрерывно-изменяющегося шага для шаропрокатных валков с постоянной и линейно-увеличивающейся толщиной реборды с выполнением условия сохранения постоянства секундных объемов;

- определено, что уравнения, выведенные для непрерывно-изменяющегося шага, являются характеристическими уравнениями кривых 2-ого порядка, что даёт возможность задания единственной кривой изменения шага по 5 точкам.

- составлена методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом.

### **3.3. Использование непрерывно-изменяющейся величины развалки калибра для построения модели шаропрокатного валка**

Для доказательства возможности использования кривых второго порядка и достаточности нахождения 5 точек для величины развалки калибра шаропрокатного валка, была проведена работа по построению модели валков с непрерывно-изменяющейся развалкой из модели валков с дискретно-изменяющейся развалкой.



Рисунок 35. Шаропрокатный валок для производства шаров условным диаметром 60 мм, с дискретно-изменяющимся шагом и развалкой

Для чистоты эксперимента в качестве базовой модели был взят комплект штатных шаропрокатных валков для производства шаров условным диаметром 60 мм, изготовленный классическим способом на токарно-винторезных станках с применением дискретно-изменяющегося шага и развалки, полученный при замене пар сменных шестерен в станке (рисунок 35). На рисунке 36 показана модель данного валка, снятая при помощи 3-D сканера.

На следующем этапе были выгружены все геометрические параметры валка в Microsoft Excel и проведен их детальный анализ. К таким параметрам были отнесены: координаты вершин реборд  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ , вынесенных из матрицы сетки 3-х мерной системы координат. В данном случае величина  $X_i$  эквивалентна шагу винтовой линии  $T_i$ . Кроме этого, были выведены параметры развалки калибра  $S_i$ , высоты реборды  $H_i$  и толщины реборды  $B_i$ .

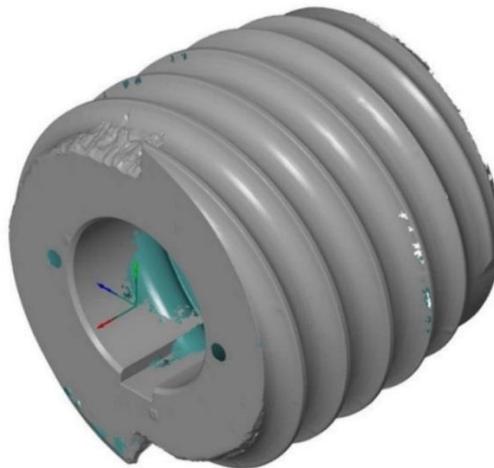


Рисунок 36. Модель шаропрокатного валка с 3-D сканера

Численное изменение всех параметров по длине валка в зависимости от угла положения координаты на винтовой линии  $\varphi$ , представлено на рисунке 37.

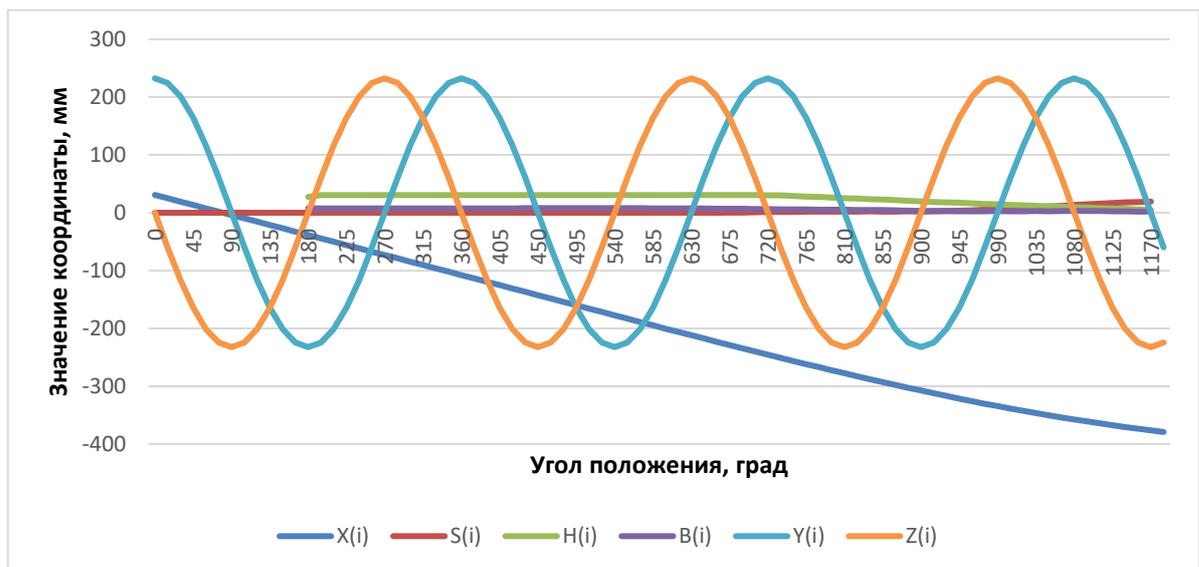


Рисунок 37. Характеристики параметров отсканированного шаропрокатного валка

Как видно по рисунку 37, координаты  $Y_i$ ,  $Z_i$  имеют достаточно устойчивый синусоидальный характер по причине характерного спирали изменения координаты в зависимости от угла поворота  $\varphi$ . Основной шаг  $T_i$ , эквивалентен представленной координатой  $X_i$ , имеет плавно-изменяющуюся кривую. Характер изменения толщины реборды  $B_i$  представлен отдельно на рисунке 38.

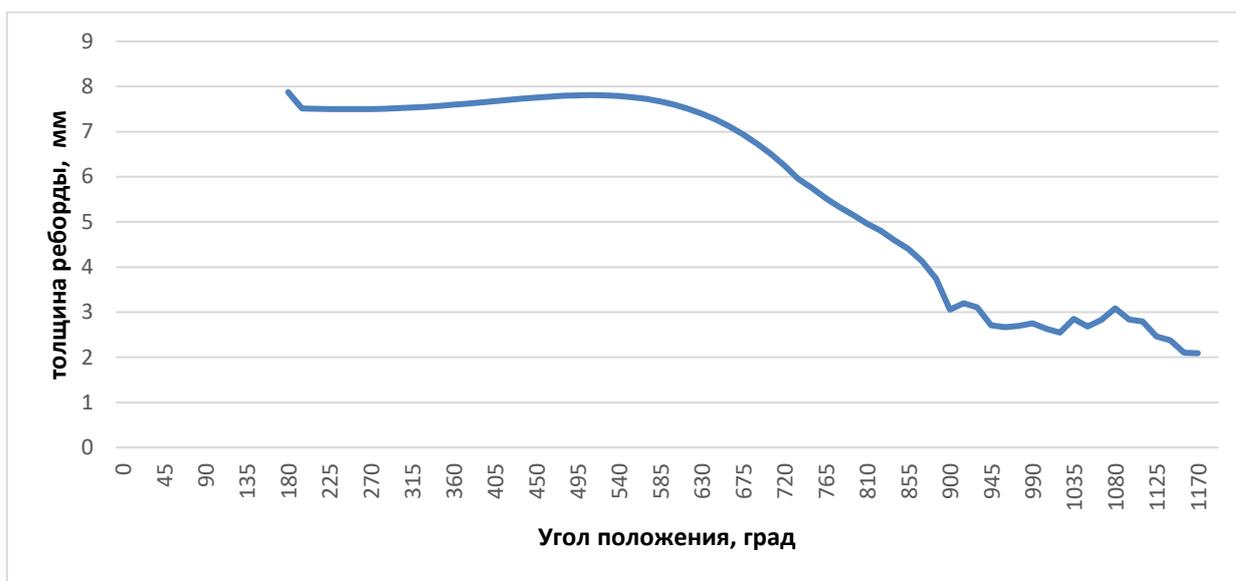


Рисунок 38. Параметры толщины реборды  $B_i$ , мм

Согласно рисунку 38, толщина реборды на калибрующем участке, при угле  $\varphi=180\dots630^\circ$ , имеет среднее значение 7,5 мм, затем начинает уменьшаться и на заходе достигает минимальных значений 2 мм. Дробления по ширине реборды, которые начинаются с угла  $\varphi=900^\circ$ , характеризуются результатом нестабильной работы резца и его частичным отгибанием при подрезке реборды  $H_i$  и при развалке калибра  $S_i$ . При изготовлении валка толщина реборды не считается основополагающим параметром, а является результатом наложения остальных параметров, таких как основной шаг, подрезка реборды и развалка калибра, кроме того, дробление в диапазоне одного миллиметра (2...3, при углах  $\varphi=900^\circ\dots1170^\circ$ ), не будет существенным. Поэтому наиболее интересными характеристиками, выходящими из общей картины, являются подрезка реборды  $H_i$

(представлена на рисунке 39) и развалка калибра  $S_i$  (представлена на рисунке 40).

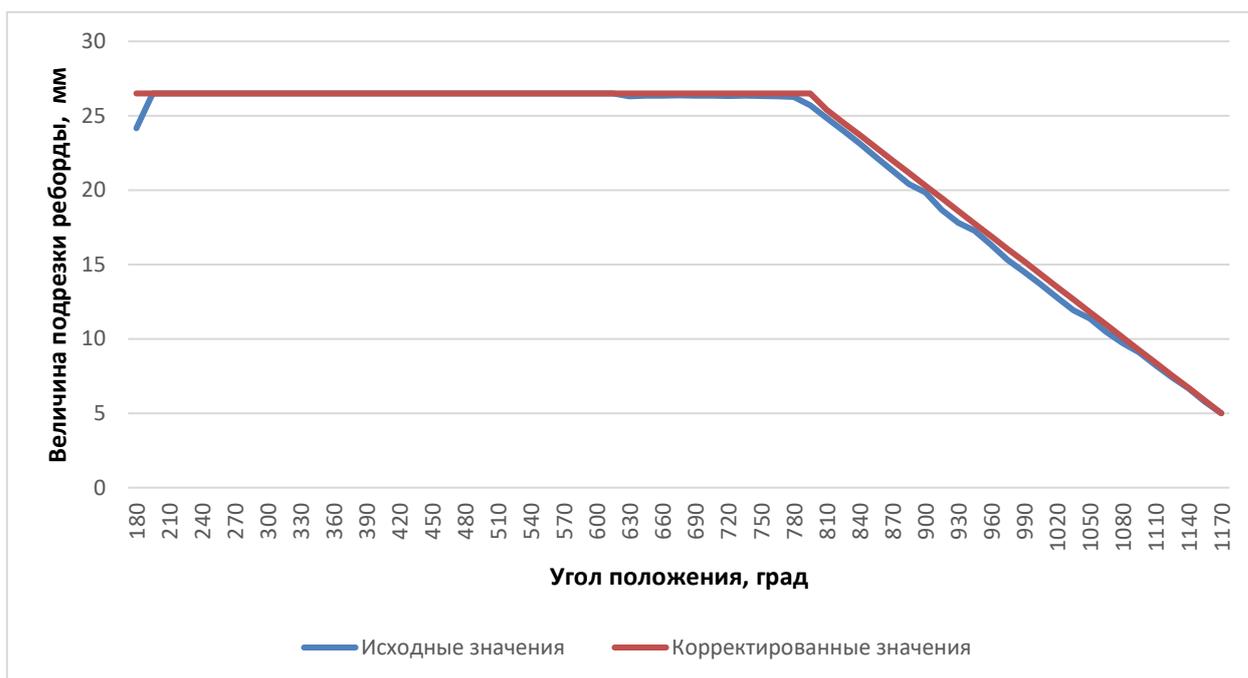


Рисунок 39. Параметры подрезки реборды  $H_i$ , мм

Исходя из рисунка 39 (исходные значения), подрезка реборды производилась с угла  $\varphi=795^\circ$ , с величины высоты реборды, равной 26,5 мм до угла  $\varphi=1170^\circ$ , где высота реборды минимальна и составляет 5 мм. Характер подрезки реборды имеет линейную зависимость, поэтому те скачки, которые появляются на данном графике, а также зарез, который начинается с угла  $\varphi=600^\circ$ , можно характеризовать как дефект изготовления и дробление резца во время обточки.

Для корректировки данных дефектов изготовления достаточно выровнять дробление и задаться линейной функцией подрезки реборды, что представлено на рисунке 39 (корректированные значения).

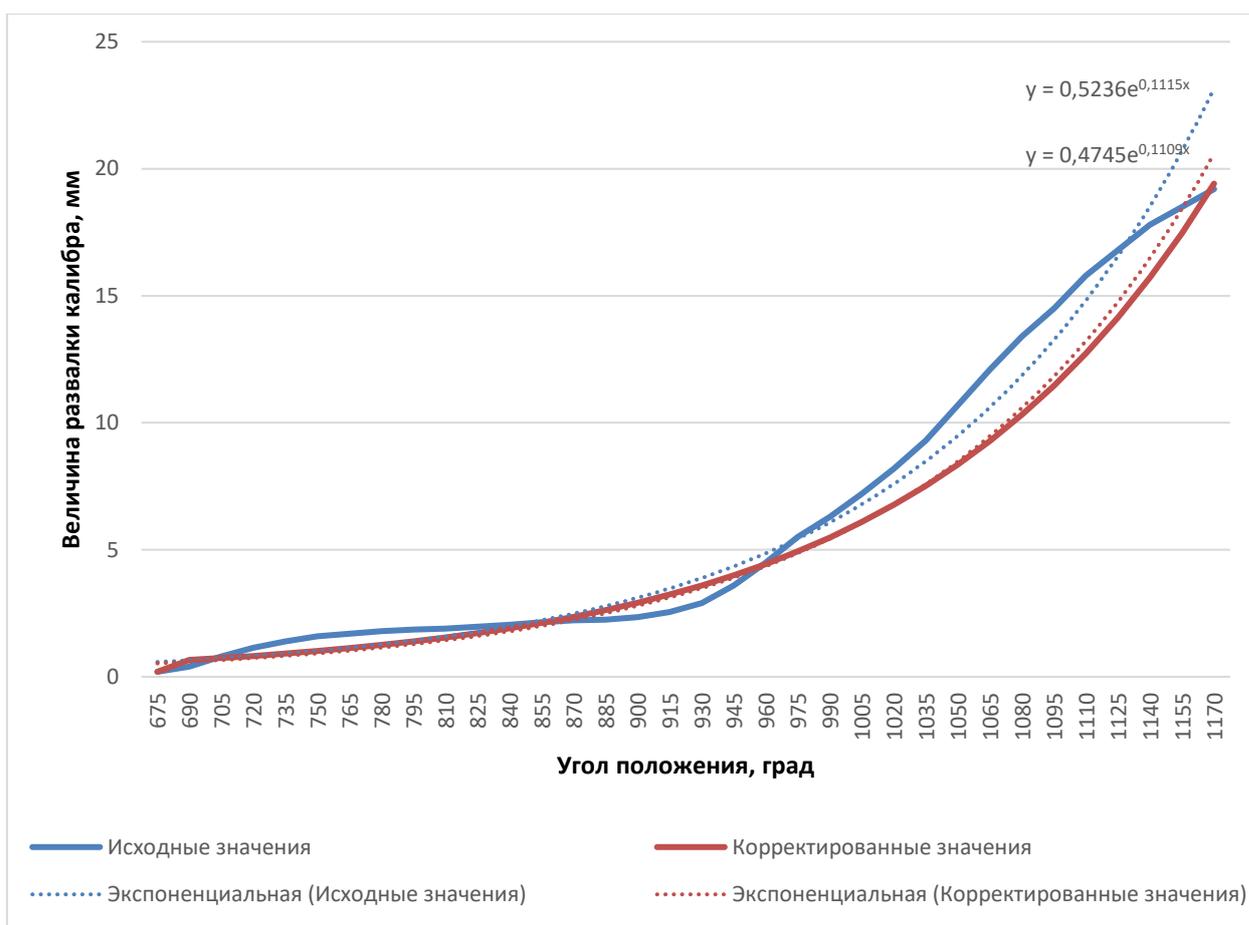


Рисунок 40. Параметры развалки калибра  $S_i$ , мм

Согласно рисунку 40 (исходные значения), видно, что за счет применения ступенчатого шага, на линии присутствуют значительные переломы при угле  $\varphi=765^\circ$  и далее через каждые  $90^\circ$ . Для сглаживания данной кривой, были применены параметры, обусловленные кривой 2-ого порядка и представлены на рисунке 40 (корректированные значения). В качестве исходных данных были заложены: величина максимальной развалки, составляющая 19 мм, соответствующая исходной, точка начала подрезки 0,2 мм на угле  $\varphi=675^\circ$ , а также 3 теоретических точки изменяющегося шага. Построенная кривая с корректированными значениями пересекается с исходной кривой в 5 точках, что показывает истинность значений для данной кривой, как кривой 2-ого порядка.

В результате анализа, для исходной кривой и корректированной кривой развалки калибра, были показаны экспоненциальные кривые, на которых

получена высокая степень сходимости данных теоретических кривых с максимальным абсолютным отклонением, не превышающем 2 мм на любом угле  $\varphi$ .

Была отредактирована исходная модель шаропрокатного валка с использованием скорректированных значений, а также получена рабочая 3-D модель, предназначенная для 5-координатного обрабатывающего центра (рисунок 41).

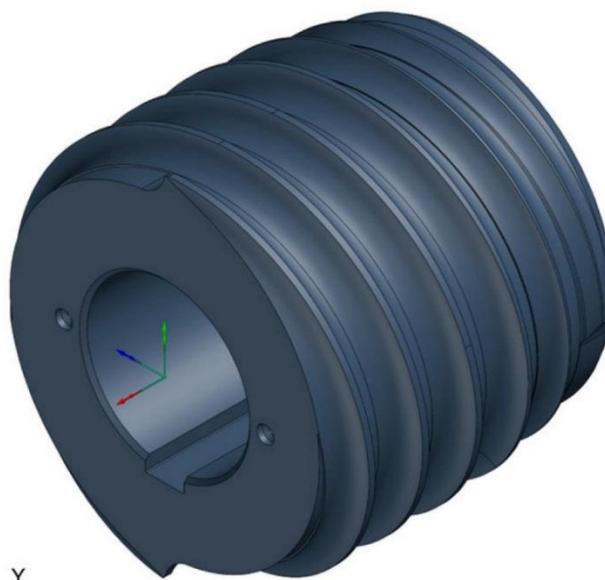


Рисунок 41. Рабочая 3-D модель шаропрокатного валка

По результатам данной работы был изготовлен комплект валков и в условиях шаропрокатного стана 40-80 прокатаны 2 опытных партии шаров диаметром 60 мм: одна с исходного комплекта валков (с которого проводилось 3-D сканирование), вторая с комплекта валков, изготовленного на 5-координатном обрабатывающем центре. При работе на валках, изготовленных на 5-координатном обрабатывающем центре, нагрузки, снятые с прокатного двигателя, были на 10-15% ниже, чем на исходных валках, уменьшилось количество скачков по нагрузкам. Также значительно уменьшился износ реборд, особенно в точках изменения шага [102].

Подводя итог, можно установить, что:

- применение кривых 2-ого порядка также характерно для параметра развалки шаропрокатных валков, для построения достаточно нахождения 5 точек кривой;

- применение в калибровках шаропрокатных валков непрерывно-изменяющихся параметров взамен дискретно-изменяющихся, позволяет существенно снизить нагрузки в процессе прокатки.

### **3.4. Исследование режимов прокатки по опытной калибровке**

Используя теорию применения характеристических уравнений для нахождения шага, описанную в п.п.3.2, и методику расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом (приложение 1) был рассчитан шаропрокатный валок для получения шара условным диаметром 120 мм. В опытном валке была использована постоянная толщина реборды по всей длине валка, которая составляла 11 мм, в связи с этим, расчет проводился по формуле (23). После определения интеграла, были найдены значения пяти точек. Основываясь на выводах п.п.3.2 и п.п.3.3, что спираль с непрерывно меняющимся шагом является кривой 2-ого порядка, по данным 5 точкам была выстроена кривая с непрерывно-меняющимся шагом, на основе которой была построена 3-D модель валка (рисунок 42).

Для проверки калибровки были использован метод конечных элементов, получаемый при построении валка и расчете постоянства секундных объемов фигур, образующихся при прокатке заготовки. Объемы образуемых фигур изменялись от  $10,73 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  до  $10,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , в конечном витке объем рассчитан на получение горячего шара диаметром 127 мм.

После изготовления валков (рисунок 43) была произведена прокатка на стане 60-120. Для получения оптимальных режимов производилась настройка стана по данной калибровке.

Результаты, полученные при изменении настроек стана в определенном диапазоне значений, приведены в таблице 8. В период настройки было прокатано 48 заготовок с применением различных параметров.

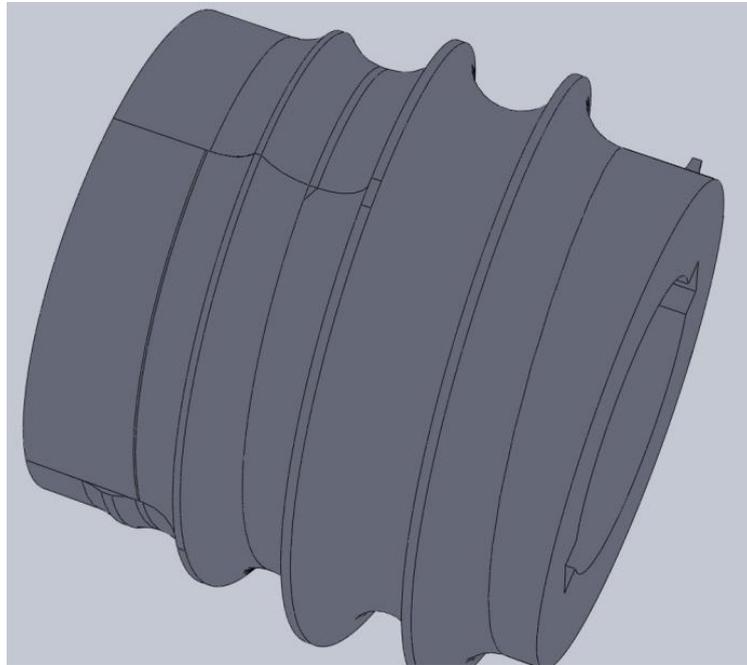


Рисунок 42. Экспериментальная 3-D модель валка  $\varnothing 120$  мм в Solid Works 2018 Professional



Рисунок 43. Валок с постоянной шириной реборды и непрерывно-меняющимся шагом

Таблица 8. Параметры настройки стана на валках для шара 120 мм

Параметр	Диапазон параметров	Результат
Угол наклона валков, град.	1-2	Недостаток металла. Размеры шара 122x124 мм, овальность, перемычка.
	2-3	Нормальное заполнение калибра. Шар 125x125.
	3-4	Перепополнение калибра. Появление следов от проводок за счет избытка металла.
Горизонтальное сведение валков. Межосевое расстояние, мм.*	Вход >698,5	Недостаточный захват заготовки, возможность пробуксовки на первом витке при попадании заготовки малого диаметра 118,5-119,5 мм.
	697-698,5	Оптимальный режим захвата
	695-697	Нормальный режим захвата, частичное получение шаров меньшего диаметра и появление плены на поверхности
	<695	Отсутствие вращения заготовки между валками, появление реек.
	Выход >698	Отсутствие закручивания шара. Неотделение перемычек на шарах
	695-698	Нормальный режим прокатки
	<695	Перепополнение калибра, заклинивание заготовки, появление следов от проводок, получаемый шар до 123 мм.
Расстояние между проводками, мм **	<122	Заклинивание заготовки, возможность получения рейки
	122-129	Рабочий диапазон
	>130	Увеличение пояска, неполное формирование шара, иногда появление перемычек
Скорость прокатки, об/мин***	<45	Недостаточно интенсивное закручивание шара перед отделением, частичное появление плены.
	>45	Оптимальный режим работы

\* - при горизонтальной настройке валков подрезной валок необходимо в большей степени смещать к оси прокатки, так, при настройках, отделение перемычки стало происходить при смещении выхода отрезного валка на 2 мм в сторону оси прокатки, что позволило перекрыть её.

\*\* - при настройке расстояния между проводок, наилучший результат был получен при расстоянии 127 мм, при этом обе проводки были смещены вверх на 1 мм от оси прокатки, т.к. при отрезном левом валке и направлении вращения валков против часовой стрелки по оси прокатки, давление создавалось на верхнюю проводку.

\*\*\* - лучший результат был получен на максимально используемых оборотах 80 об/мин, но, согласно п.п.2.2., при частоте вращения валков выше 63 об/мин, появляется интенсивный износ реборд на захвате, поэтому в дальнейшем режим работы был ограничен данным значением.

Кроме этого, заготовки подавались в стан с разной температурой и временем выдержки в печи. Оптимальный режим прокатки был получен на температуре заготовки 1000-1040°C. На перегретых заготовках (находящихся в печи дольше необходимых значений), и заготовках с температурой выше 1040°C в конце прокатки каждой заготовки, на последнем шаре, появлялся «Эффект Маннесмана» [35] – вскрытие осевой полости и образование шара с отверстием. Это приводило к проблемам в отделении шаров при сортировке, а также к появлению повышенных нагрузок на последнем шаре, что видно по регистрируемым моментам прокатки на рисунке 44(б). Характер нагрузок, получаемый от «эффекта Маннесмана», представляет скачок выше максимального момента в 6000Нм, а затем резкое падение до отрицательных значений в «-1000Нм», что объясняется как создание нагрузки противоположно окружной нагрузки валков за счет её резкого снятия после выпадения дефектного шара и продолжения вращения за счет маховика.

Также согласно данным рисунков 44(а), 44(б), регистрируемые моменты прокатки на данных валках значительно ниже и не превышают 4000 Нм, чем моменты, снятые при прокатке 120 шара при применении штатных калибровок с дискретно-изменяющимся шагом, зарегистрированные на рисунке 21, где значения моментов достигали 6000 Нм.

Динамические изменения момента составляют ~25% от максимального момента и находятся в диапазоне 3000Нм-4000Нм, что характеризуется применением реборды с толщиной 11 мм. В отличие от калибровки, где толщина реборды в зоне захвата 49,5 мм и динамика изменения момента

достигала  $\sim 70\%$  (от 1500Нм до 6000Нм) (см. рисунок 21.б), данная калибровка более приемлема в плавности врезки реборды в заготовку.

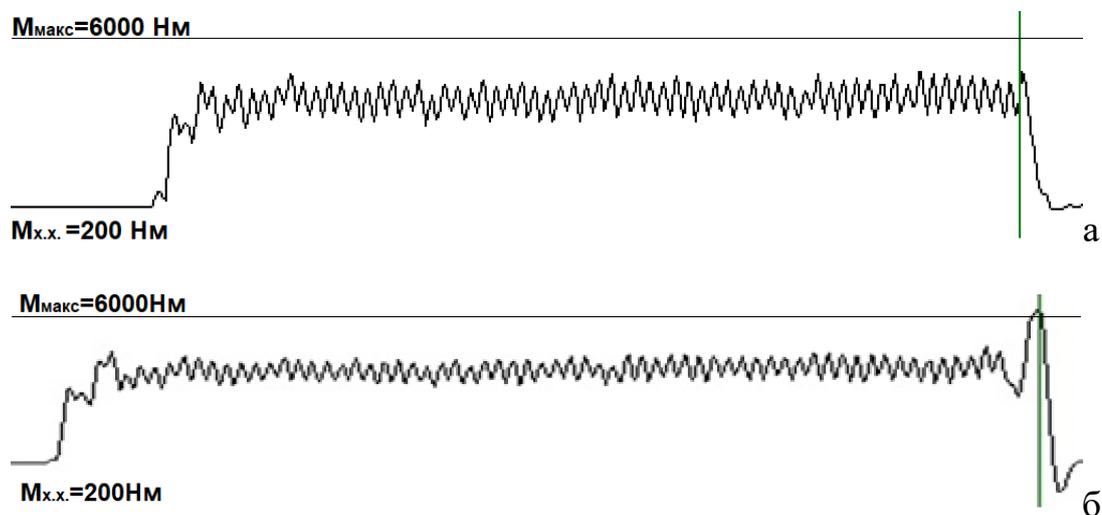


Рисунок 44. Моментная характеристика при прокатке заготовки:

а. – при  $t^\circ=1040^\circ$ ; б. –  $t^\circ=1150^\circ$

В сравнении с калибровкой, где толщина реборды в зоне захвата составляла 3,99 мм, а динамика изменения момента  $\sim 15\%$  (от 5000Нм до 6000Нм) (см. рисунок 21.а), данная калибровка дает диапазон скачкообразности нагрузок на 10% больше из-за более резкого захвата. Однако, учитывая, что максимальный момент на новой калибровке на 25% ниже, можно установить, что превышение данной динамики изменения момента незначительно, при этом стойкость реборды на новой калибровке значительно выше за счет почти 3-х кратного увеличения толщины с достижением необходимого условия прочности.

В итоге, после получения оптимальных настроек стана, а также режимов нагрева заготовки и прокатки, геометрия получаемого шара, в холодном состоянии, на новых валках составила  $125\pm 0,4$  мм, что укладывается в требования (таблица 2) с большим запасом, на шаре остается незначительный поясик и практически отсутствуют поверхностные дефекты (рисунок 45) [103].



а

б

Рисунок 45. Шары, полученные на экспериментальной калибровке:

а. - проба шара; б. - шары на транспортере

Таким образом, данное исследование показало, что:

- использование валков с непрерывно изменяющимися параметрами, а, в конкретном случае, с непрерывно-меняющимся шагом, перспективнее и имеет более высокую энергоэффективность;

- нагрузка при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом при прокатке снизилась на 25-35% в отличие от валков с дискретно-меняющимся шагом.

- при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом, изготовленных на 5-координатном обрабатывающем центре, есть возможность получать шары с высокой степенью геометрических размеров и

с минимальным количеством поверхностных дефектов (Приложение 2 Акт О результатах проведения опытной прокатки от 30 апреля 2018 г.)

- для предотвращения появления эффекта Маннесмана, создающего не только появление дефектных шаров, но также существенный динамический скачок во время прокатки, температура нагрева заготовки не должна быть выше 1040°C;

- при прокатке на валках, учитывающих сохранение постоянства объема, часть металла при захвате переходит обратно в заготовку, что в дальнейшем приводит к незаполнению калибра и получению шара меньшего диаметра. Этот процесс доказывает неоднозначность выполнения условия на практике, однако изменение настроек стана на таких валках позволяет решить данный вопрос и получить необходимый размер шара.

- разработаны рациональные режимы настройки шаропрокатного стана, используя которые возможно не только получение продукции с качественной геометрией, но и существенное увеличение ресурса валков за счет уменьшения воздействия на валки повышенных давлений в результате переполнения калибра или механического износа за счет контакта с проводками (Приложение 2 п.№2. Акта О результатах внедрения инициатив на участке ШПС от 23.09.2020г.)

### **3.5. Моделирование прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимся шагом**

Опыт, описанный в п.п.3.3, подтверждает перспективность применения калибровок шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимися параметрами, однако для дальнейшего проектирования следует проверить возможность современных систем симуляции процессов обработки металлов давлением. Также следует подтвердить возможность использования программ симуляции при проектировании калибровок с непрерывно-изменяющимися параметрами. Исходя из этого, актуальным является

сравнение результатов моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки шаров в программном комплексе Deform 3D с предыдущим опытом производства шаров в условиях стана 60-120, при использовании калибровок валков с непрерывно-изменяющимся шагом и постоянной толщиной реборды. Это необходимо для доказательства адекватности предложенной модели и перспективной разработки калибровок с непрерывно-изменяющимися параметрами.

В качестве программного обеспечения для проведения симуляции процесса прокатки шаров был использован комплекс Deform Integrated 2-D, 3-DV2019. В качестве модели валков были использованы 3-D модели, разработанные для опыта (рисунок 38) в программе SolidWorks 2018 Professional, по которым на 5-координатном станке изготавливались сами валки, и в дальнейшем производилась прокатка. Настройка параметров расположения валков выбиралась из тех, по которым были достигнуты наилучшие показатели согласно режимам настройки во время опытной прокатки, описанной в п.п.3.3:

- Вертикальный угол наклона валков  $\beta=3^\circ$ ,
- Межосевое расстояние между валками на входе 697 мм,
- Межосевое расстояние между валками на выходе 698 мм,
- Расстояние между проводками 125 мм,
- Скорость прокатки 45 об/мин,
- Температура заготовки 1040°C.

Кроме этого, с условием возможности выполнения процесса и для оптимальности времени расчета (в связи с потребностью программного обеспечения и возможности компьютера), были заданы следующие значения:

- Длина заготовки 1 м (вместо 6 м, используемой при прокатке),
- Диаметр заготовки 120 мм (среднее значение из поля допуска на заготовку),
- Величина сетки 60000 элементов.

Наблюдаемые точечные напряжения в каждой элементарной ячейке сетки (Stress – Effective), возникающие в процессе прокатки и их расположение по поверхности заготовки, представлены на рисунке 46.

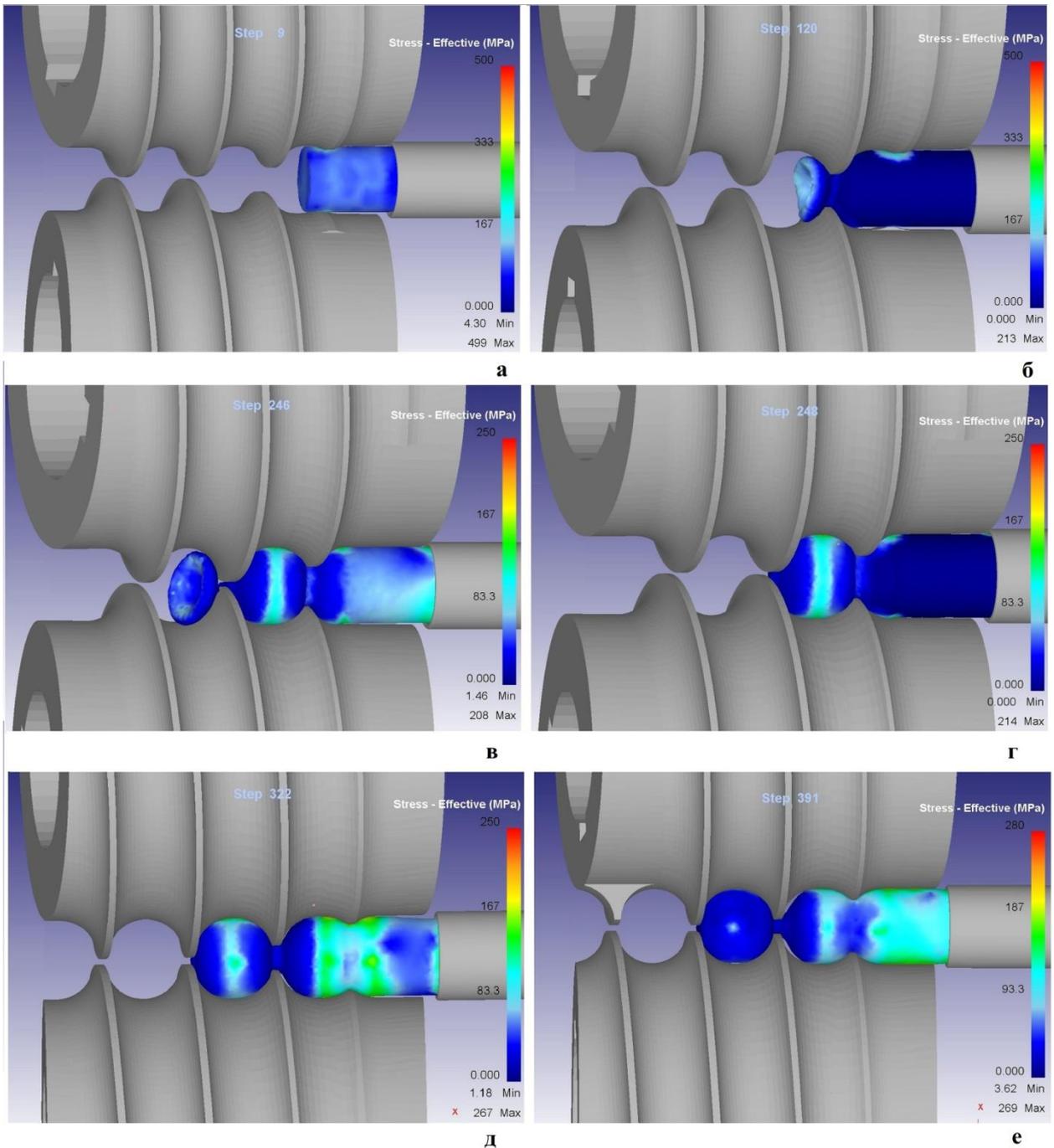


Рисунок 46. Результаты расчета точечных напряжений, возникающих при прокатке шаров на шаге:

а. – 9; б. – 120; в. – 246; г. – 248; д. – 322; е. – 391.

Рассмотрение процесса начнем с момента захвата заготовки валками. При контакте заготовки с валком возникают интенсивные напряжения, которые вызваны динамическим воздействием валков на заготовку при ее раскручивании из нулевой окружной скорости. В связи с малой площадью контакта заготовки с валком, расчетные напряжения в месте контакта (рис. 46.а) достигают 160 МПа, при этом максимальные точечные напряжения, согласно модели – 499 МПа. Это еще раз подтверждает возникновение описанного во второй главе интенсивного износа валков в зоне захвата (см. рисунок 7) [46, 87, 90-91].

На следующем обороте валка реборда повторно врезается в заготовку, однако ей уже задано вращение, она обкатывается совместно с валком (рисунок 46.б), поэтому напряжения, возникающие в зоне контакта реборды с валком снижаются и не превышают 160 МПа, а пиковое напряжение в заготовке составляет 213 МПа, что более чем в 2 раза ниже, чем напряжение при первоначальной врезке реборды.

Представляет интерес формирование концевой обреза – «половинки», характерное для данного процесса получения мелющих шаров. Отделение первой «половинки» заготовки произошло между 246 шагом (рисунок 46.в) и 248 шагом процесса моделирования (см. рисунок 46.г). В зоне отделения перемычки не наблюдается высоких значений напряжений, отделение происходит за счет утоньшения перемычки и разницы диаметров контактирующих реборд прокатного инструмента (следствие встречной направленности векторов окружных скоростей, возникающих под действием отрезного и неотрезного валка). После отделения «половинки», на шаре остается перемычка, которая также в дальнейшем отделяется в процессе прокатки, и уже на 322 шаге модели (рисунок 46.д.) она практически отсутствует. Остатки перемычки в дальнейшем закатываются в тело шара, который после отделения от заготовки на последнем обороте валка, вращается вокруг оси, не совпадающей с начальной осью заготовки. Особенно следует отметить, что значения напряжений, возникающие в

перемычках, при дальнейшей прокатке заготовки (рисунок 46.д, рисунок 46.е.), исключая зону захвата, не превышают значения напряжений в остальной части заготовки, что абсолютно было невозможно на ранее используемых калибровках. Равномерность обжатий возможно объяснить следующими параметрами: толщина реборды постоянна и составляет 11 мм (что не создает повышения контактного давления в процессе ее врезки), выполняется условие сохранения постоянства объема на протяжении всего процесса прокатки. Согласно рисунку 46.е, на 391 шаге шар имеет конечную геометрию и равномерные контактные давления по всей поверхности шара, составляющие около 30 МПа. В формирующей зоне валка продолжает происходить дальнейший процесс формирования, и значения напряжений достигают 80-100 МПа, в то время как максимально-достигнутое точечное напряжение составляет 269 МПа. Исследуя, согласно модели, напряжения в валках с непрерывно-изменяющимся шагом по заданной функции с постоянной шириной реборды, к преимуществам можно отнести равномерность напряжений на поверхности шара после зоны формирования, равномерность напряжений в перемычке.

Рассмотрим значения абсолютных деформаций в процессе формирования шаров прокатными валками с новой калибровкой.

Согласно рисунку 47.а, максимальные значения абсолютных деформаций возникают не со стороны воздействия валков в зоне врезки реборды, а со стороны свободной части заготовки в первой половинке, что приводит к интенсивной деформации металла в осевом направлении. Другими словами, образованная «половинка» утягивается в сторону перемычки, аналогично, как было описано в работе [34] и подтверждено опытом п.п.3.2. Максимальные значения абсолютных деформаций, возникающие в данной зоне, достигают 45,3 мм.

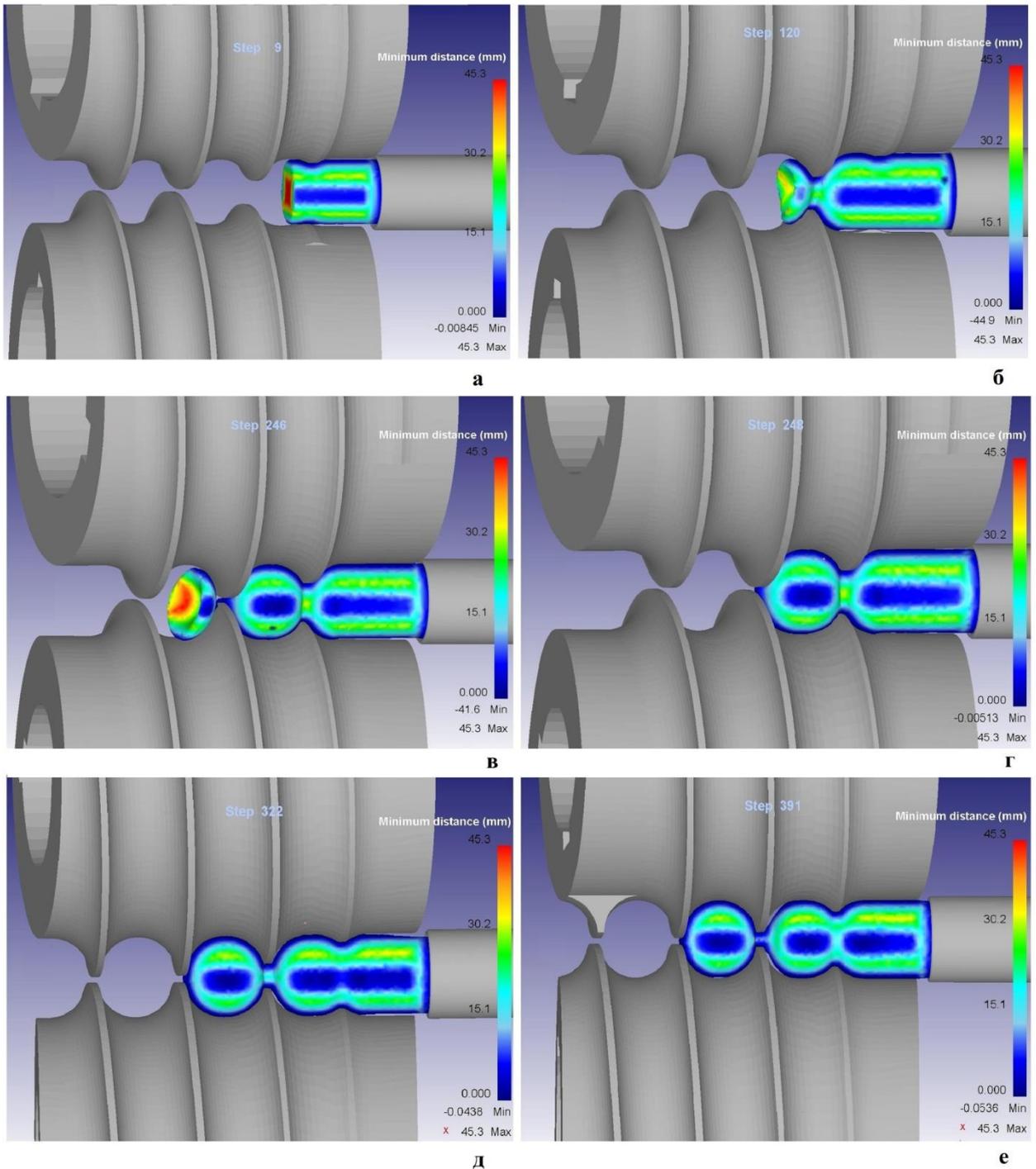


Рисунок 47. Результаты расчета деформаций, возникающих при прокатке шаров на шаге:

а. - 9; б. - 120; в. - 246; г. - 248; д. - 322; е. - 391.

Рассматривая дальнейший процесс формирования, исключив формирование половинки, в остальных зонах абсолютные деформации распределены более равномерно, и не превышают значения 30 мм при этом в перемычке и по длине калибра они соизмеримы по значениям, по рисункам

47(б), 47(д) видно, что на поверхности заготовки деформация металла незначительна, а в центральной осевой зоне заготовки также происходит снижение значений деформации (в связи с этим в данном процессе возможно вскрытие полости). Основная деформация происходит по участкам указанными зеленым цветом, в средних значениях 20-30 мм.

В перемычке металл первоначально деформируется одновременно со сферической поверхностью заготовки а перед отделением половинки престаёт деформироваться, и перемычка удаляется вместе с половинкой. Максимальные значения абсолютных деформаций достигают -44,9 мм и -41,6 мм, согласно рисункам 47(б) и 47(в) соответственно, данный эффект можно объяснить тем, что в краевой зоне половинки вместо обжатий металл испытывает растяжение. После отделения половинки, отрицательные значения деформаций составляют порядка 0,05 мм, что практически объясняет дальнейшее отсутствие 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 отрицательные деформации, что приводит к образованию внутри шаров пустот, которые являются внутренним дефектом [35,37,48].

При данной калибровке валков, с сохранением постоянства объема на протяжении всего процесса прокатки, возникающие растягивающие деформации имеют минимальные значения и никак не влияют на геометрию и внутреннюю структуру получаемых шаров. Согласно рисунку 47.е, уже после 1 оборота валка получаемая фигура приближена к форме шара и при дальнейшей прокатке ее обжатие происходит со всех сторон, практически, равномерно.

Равномерность обжатия после отделения шара приводит к высокой точности полученной геометрии шара. В отличие от большинства используемых калибровок, где максимальные напряжения и износ

сосредоточен на ребрах валка, в данной калибровке интенсивность испытывается только в зоне врезки, а затем обжатие металла становится более равномерное со всех сторон. На рисунке 47.е на 391 шаге мы видим практически сформированный шар (наблюдается незначительная перемычка и поясок), идентичный реальному (см. рисунок 45.а), полученному в результате опытной прокатки с данной калибровкой валков [62].

В большинстве представленных ранее работ по моделированию процесса прокатки шаров, в моделях отсутствует отделение половинок и шаров, а модель представлена в виде «гирлянды» [27, 38, 46, 49]. В данной работе отделение половинки происходит на 247 шаге (рисунок 48.б). Основными критериями для отделения половинки или шаров друг от друга являются асимметричность диаметров валков и момент скручивания, которые создают такие условия, при которых происходит разрушение межкусталлических связей металла и рост дислокаций с дальнейшим отделением металла. Критерий разрушения, как видно на рисунке 48(а), интенсивно растет при утоньшении перемычки и достигает значений 6,43, а при достижении значения 15,1 (рисунок 48.б), происходит отделение половинки.

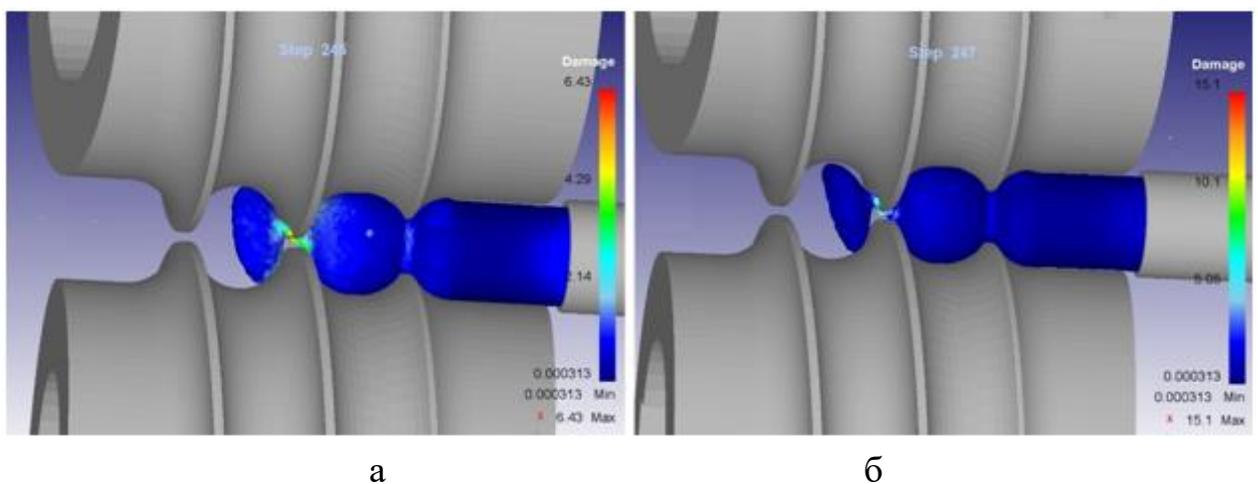


Рисунок 48. Критерии разрушения, при отделении перемычки на шаге:

а. 245; б. 247

В качестве модели была выбрана сталь из ряда, предложенного библиотекой Deform. В реальных условиях для прокатки шаров используются стали Ш-2, Ш-2Х, Ш-3, Ш-3Г, Ш-3Р специального назначения, имеющие более низкий коэффициент разрушения 6...8. При возможности использования данных сталей в модели, отделение половинки произошло бы еще на 245 шаге Рисунок 48.а.

На рисунке 49 изображена половинка, полученная с опытной прокатки. Как видно, половинка имеет форму вогнутой чаши, что подтверждает сопоставимость с появлением растягивающих напряжений при формировании половинки (рисунки 47.б, 47.в.), а полученная половинка (рисунок 49) по форме идентична половинке, изображенной на рисунке 48.а., полученной на 245 шаге, и доказывает вышеописанный критерий разрушения [105,106].



Рисунок 49. Половинка, полученная при опытной прокатке

В приведенном исследовании:

- получены процессы моделирования прокатки шаров в программе Deform-3D на ранее смоделированных валках с непрерывно-изменяющимся шагом и постоянной шириной реборды по заданной функции изменения шага с условием сохранения постоянства объема.

- результаты моделирования с высокой долей аппроксимации сходятся с результатами опытной прокатки шаров на валках, изготовленных по данным 3-D моделям. Качество геометрии получаемого шара, что в опытной прокатке, что в модели Deform, значительно превышает требования ГОСТ, это доказывает перспективность использования валков с непрерывно-изменяющимися параметрами;

- при высокой степени соответствия настроек стана, материалов, условий и режимов прокатки как при опытной прокатке, так и в программе Deform, получены идентичные результаты, вплоть до соответствия нагрузок и геометрии первой полученной половинки, что доказывает дальнейшую возможность использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимися параметрами, с высокой степенью достоверности результатов моделирования.

### **3.6. Модель расчета калибровки валков с переменной глубиной впадины**

В качестве перспективной технологии предлагается модель калибровки валков с переменной глубиной впадины. При такой схеме калибровки необходимо определять глубину проточки калибров. В таких калибрах толщина реборды сохраняет постоянную величину. Основной переменной будет изменение глубины впадины витков калибра.

Согласно рисунку 50, применяя известные параметры, находим изменение радиуса образующей шара.

Для данной калибровки справедливо уравнение:

$$V_{пан} + V_{шан} - V_{пан+1} - V_{шан+1} = 0. \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \pi r_{ан}^2 b_{\alpha} + \left( \frac{3}{4} \pi R_{ан}^3 - r_{ан}^2 \left( R_{ан} - \frac{r_{ан}}{3} \right) \right) - \pi r_{ан+1}^2 b_{\alpha} \\ & - \left( \frac{3}{4} \pi R_{ан+1}^3 - r_{ан+1}^2 \left( R_{ан+1} - \frac{r_{ан+1}}{3} \right) - r_{ан}^2 \left( R_{ан} - \frac{r_{ан}}{3} \right) \right) \\ & = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

В предлагаемой калибровке необходимо вывести функцию для всей длины профиля, поэтому прибегнем к методу конечных элементов, где  $r_{ан+1}=0$ , т.к. условно реборда сводится до соприкосновения, подставив в уравнение 30, получим:

$$\pi r_{ан}^2 b_{\alpha} + \frac{3}{4} \pi R_{ан}^3 - \frac{3}{4} \pi R_{ан+1}^3 = 0, \quad (31)$$

изменение глубины  $\Delta R = R_{ан+1} - R_{ан}$ , получаем

$$\Delta R = \sqrt[3]{\frac{4}{3} r_{ан}^2 b_{\alpha} + R_{ан}^3 - R_{ан}}. \quad (32)$$

Т.к. при увеличении радиуса канавки разлет радиуса идет во всех направлениях, то  $\Delta R = \Delta T$

Задавшись переменным значением  $0 < r_{ан} < R$ , где,  $r_{ан}$  - радиус предыдущего положения, а  $R = R_{ан}$  - радиус заготовки получим значение изменения шага:

$$\Delta t_{\alpha} = \int_0^R \left( \sqrt[3]{\frac{4}{3} x^2 b_{\alpha} + R^3 - R} \right) dx. \quad (33)$$

При применении калибровки с переменной глубиной впадины, обжатие будет происходить равномерно со всех сторон, обеспечивается постоянное прилегание заготовки к валку на протяжении всей длины, что увеличивает площадь контакта и рассредоточивает нагрузку, а значит дает более оптимальные режимы обжатия [107].

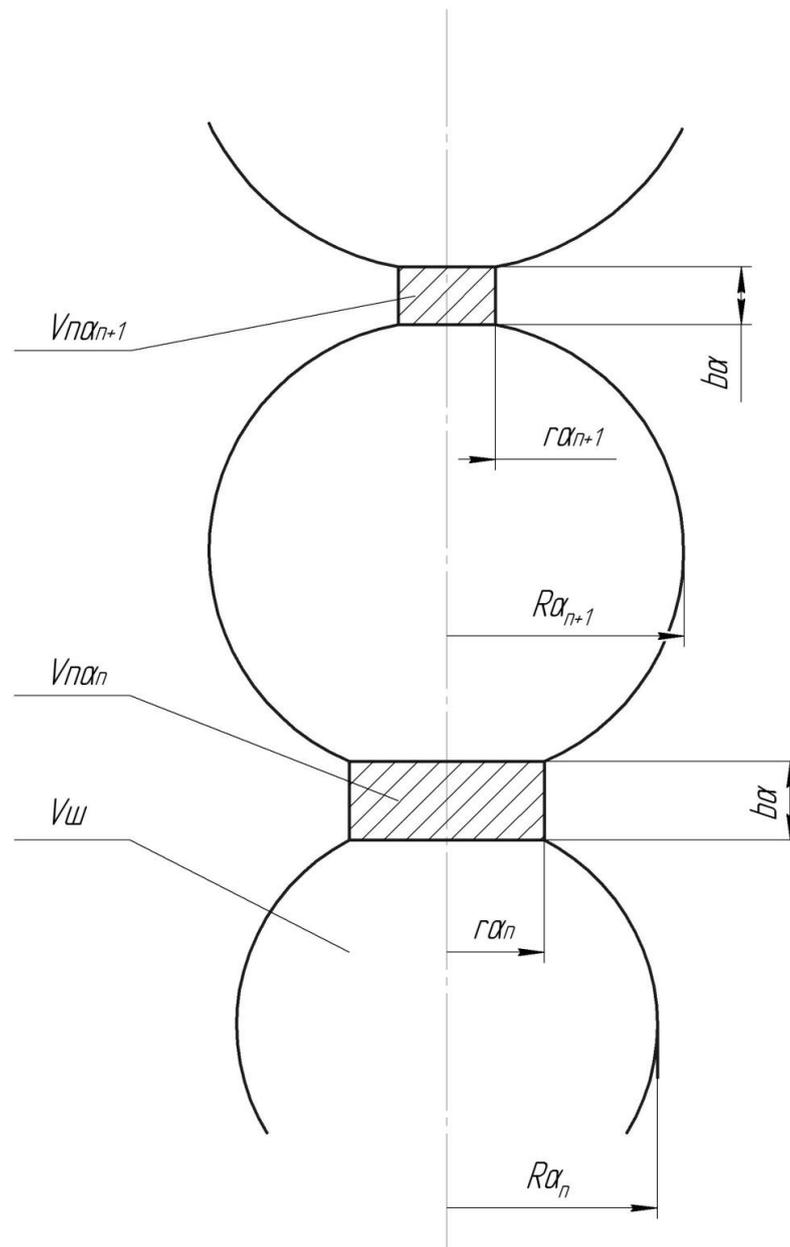


Рисунок 50. Сечение заготовки во время прокатки на валках с переменной глубиной впадины

Одной из проблем реализации данной калибровки являются возможности современного металлорежущего оборудования, поэтому рассмотрим возможность получения непрерывно-изменяющейся глубины впадины, в зависимости от существующего оборудования.

Имея функции (23, 28), можно легко определить изменение шага для калибровок с переменным шагом, получаемых способом развалки калибров. Большинство современных токарных станков с ЧПУ имеют независимую

подачу и, написав программу с задачей необходимой функции изменения шага, можно получить необходимый профиль.

Получение калибровки с переменной глубиной впадины может быть обеспечено только на 5-координатных обрабатывающих центрах, причем в данном случае появляется ряд условий.

С учетом того, что радиус одновременно увеличивается во всех направлениях, недостаточно иметь продольную и поперечную подачу, включая переменный шаг, необходимо иметь функцию изменения радиального вреза обрабатываемого инструмента. Кроме этого продольная подача будет увеличиваться одновременно с радиальным врезом, что приведет к ряду проблем при использовании обрабатывающего центра на основе токарного станка, т.к. вращение самого валка будет незначительно по сравнению со скоростью резания.

Учитывая ряд действующих причин, определяем основные схемы возможной обработки, представленные на рисунке 51.

Под рисунками 51.а, 51.б обработка идет при помощи летучего резца с выдвигающимися режущими пластинами, где процессы резания происходят за счет скорости резания  $D_r$ , а поворот валка на заданные углы за счет окружной подачи  $D_\alpha$ . Увеличение радиуса обрабатываемой канавки происходит за счет выдвижения режущих пластин  $D_z$ . Закон выдвижения, записываемый программой, определяется формулой (33) -  $D_z = \Delta t_\alpha$ , по этому же закону будет происходить изменение шага продольной подачи  $D_s = T_{\text{очн}} + \Delta t_\alpha$ . Разница между процессом «а» и «б» (рисунок 51) в том, что продольная подача в первом случае производится при помощи перемещения летучего резца по оси  $x$ , а во втором – перемещением в обратном направлении валка, закрепленного в цанговом патроне со скользящей посадкой и приводом продольного перемещения. Выбор того или другого метода будет зависеть от возможности станка, но в обоих случаях возможна только обработка валков, используемых на станах прокатки шаров большого диаметра  $>100$  мм, т.к. возможности летучего резца ограничены наименьшим

обрабатываемым диаметром. В случае, где пластины дополнительно имеют регулируемый вылет, диаметр приобретает значения, в параметрах соизмеримые с диаметром обрабатываемой детали при заданной мощности оборудования. Все движения подач  $Dz$ ,  $D\alpha$ ,  $Ds$  и скорость резания  $Dr$  в случаях рисунки 51(а), 51(б) - будут происходить одновременно, что задает непрерывность процесса обработки.

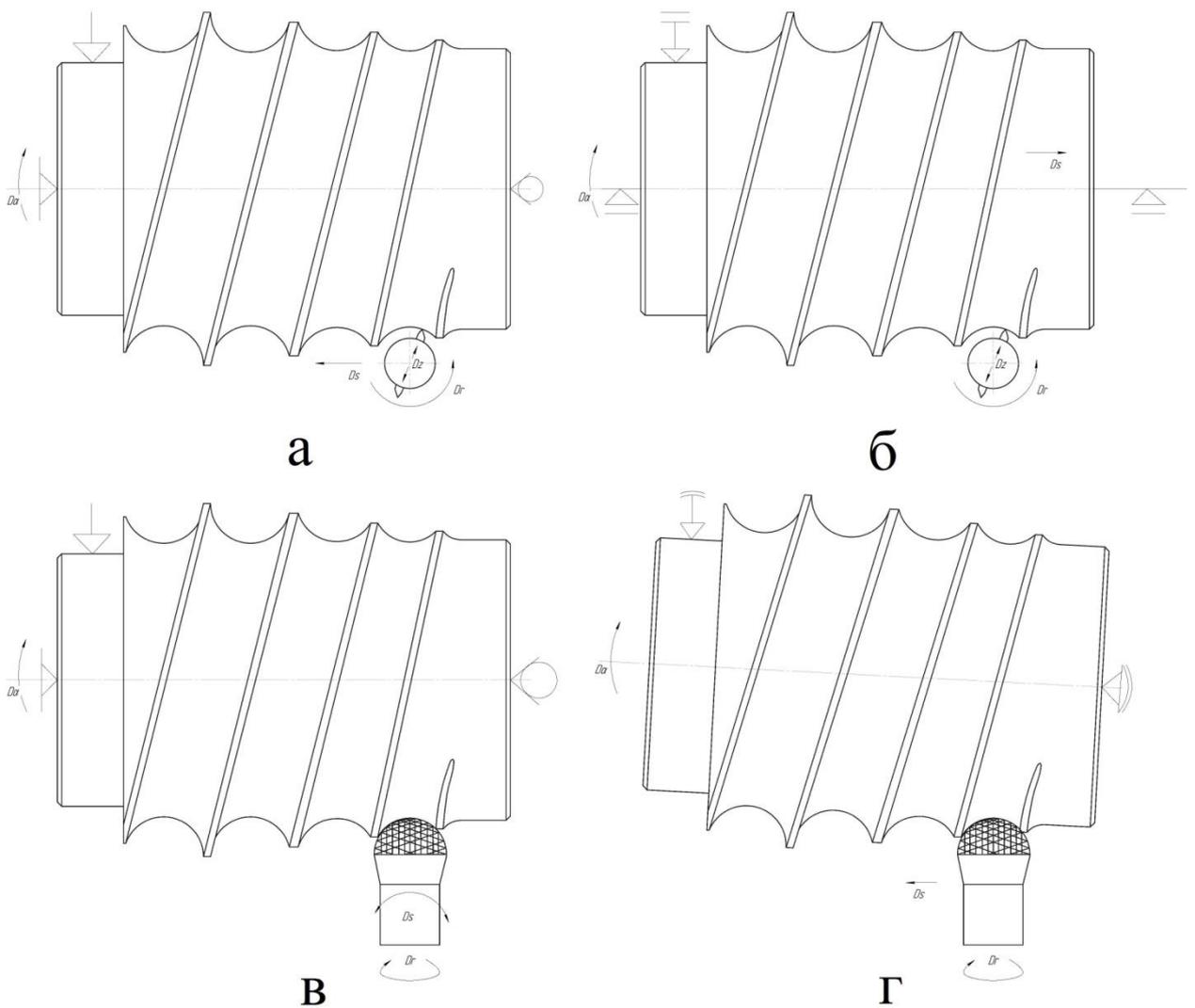


Рисунок 51. Предполагаемые технологии обработки профиля

Для обработки валков с диаметром получаемого шара  $<100$  мм, предлагается использовать фрезерную головку (рисунки 51.в, 51.г) – в данном случае может быть использована кукурузная фасонная фреза из быстрорежущей стали и при такой обработке, кроме высокой

производительности, возможно получить высокое качество поверхности. Подача фрезы  $D_s$ , при обработке будет повторять возвратно-качательное движение по дуге, при этом, с каждым следующим шагом, радиус дуги будет увеличиваться на величину  $n$ , определяемую законом по формуле 33. В таком процессе поворот валка на угол  $\alpha'$  будет производиться дискретно для обеспечения совершения полного возвратно-качательного движения фрезы, по заданной программе. Кроме того, что для данного метода необходимо рассчитывать координаты инструмента для каждого поворота на угол  $\alpha'$ , нужно также применять функцию дуги и функцию изменения дуги. При уменьшении степени дискретности окружной подачи валка, на поверхности канавок будет возникать характерный рисунок, образованный ступенями, сетка которого будет увеличиваться. Однако данная сетка, как показала практика, в процессе прокатки шаров является преимуществом, обеспечивая более высокий коэффициент трения и лучшее сцепление валка с заготовкой.

В случае «г» (рисунок 51.г.), перемещение инструмента  $D_s$  будет происходить, как и в «а» (рисунок 51.а.), по функции (33), с шагом  $D_s = T_{\text{осн}} + \Delta t_\alpha$  но при этом с возвратно-поступательными движениями, равными величине  $\Delta t_\alpha$ , для обеспечения осевой развалки калибра, а радиальное увеличение глубины вреза будет происходить за счет качания валка по оси  $Y$ , что возможно обеспечить использованием сферического патрона со смещающейся осью. Равномерность развалки в этом случае будет обеспечена геометрией инструмента, а угол наклона зависеть от установочных размеров и изменяться также по формуле (33). В этом случае возможно использовать более высокую степень дискретности  $D_a$  при той-же производительности, либо более высокую производительность изготовления за счет уменьшения холостых ходов инструмента [96].

Таким образом, можно сказать, что

- была разработана модель калибровки для валков с переменной глубиной канавки, которая обеспечит постоянное прилегание заготовки к валкам и создаст оптимальные режима прокатки. Для данной модели были

найжены значения изменения шага от изменения радиуса с условием сохранения постоянства объемов;

- определено преимущество использования оборудования с ЧПУ различной конструкции для производства валков шаропрокатных станов.

### 3.7. Выводы

- аналитически получены функции значений непрерывно-изменяющегося шага для шаропрокатных валков с постоянной и линейно-увеличивающейся толщиной реборды при выполнении условия сохранения постоянства секундных объемов;

- определено, что функциональные зависимости непрерывно-изменяющегося шага и параметров развалки калибра являются характеристическими уравнениями кривых 2-ого порядка. Это позволяет однозначно определить положение образующей кривой (изменения шага и развалки калибра) по 5 точкам.

- составлена методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом.

- применение в калибровках шаропрокатных валков непрерывно-изменяющихся параметров взамен дискретно-изменяющихся, позволяет существенно снизить нагрузки в процессе прокатки, что дает большую энергоэффективность. При использовании валков с непрерывно-изменяющейся развалкой, нагрузки при прокатке снижаются на 10%, а при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом – на 25-35% в отличие от валков с дискретно-изменяющимися параметрами.

- при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом, обеспечивающим условие постоянства объемов, есть возможность получать шары с высокой степенью геометрических размеров и с минимальным количеством поверхностных дефектов.

- для исключения появления эффекта Маннесмана, создающего не только появление дефектных шаров, но также существенный динамический скачок во время прокатки, определено, что температура нагрева заготовки не должна превышать  $\approx 1040^{\circ}\text{C}$ ;

- при прокатке на валках, при номинальных настройках стана, часть металла при захвате смещается в сторону заготовки, что в дальнейшем приводит к неполному заполнению калибра и получению шара меньшего диаметра, однако изменение настроек стана на таких валках позволяет решить данный вопрос и получить необходимый размер шара.

- разработаны рациональные режимы настройки шаропрокатного стана, при которых возможно получение продукции с высоким качеством геометрических параметров. Также, благодаря рациональным настройкам стана, существенно увеличился ресурс валков за счет равномерного распределения контактных давлений и исключения контакта с проводками, приводящего к механическому износу.

- впервые произведено моделирование прокатки шаров в программе Deform-3D с использованием валков с непрерывно-изменяющимися параметрами. Также впервые в данной модели был получен процесс отделения половинки. Результаты моделирования с высокой долей аппроксимации сходятся с результатами опытной прокатки шаров на валках, изготовленных по данным 3-D моделям. Точность геометрических параметров получаемого шара как в опытной прокатке, так и в модели Deform, значительно превышает требования ГОСТ, и составляют  $125+0,4$  мм для шара с условным диаметром 120;

- использование в модели реальных настроек стана, материалов, условий и режимов прокатки, позволило сравнить результаты моделирования и опытной прокатки. В результате получена высокая степень соответствия нагрузок и геометрии шаров (в том числе первой половинки), что доказывает дальнейшую возможность использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-

изменяющимися параметрами, с высокой степенью достоверности результатов моделирования.

- впервые была разработана модель калибровки для валков с переменной глубиной впадины, которая обеспечивает постоянное прилегание заготовки к валкам и создаёт более равномерное распределение контактных давлений по поверхности шара. Для данной модели были найдены значения изменения шага от изменения радиуса, с условием сохранения постоянства объемов;

- определено преимущество использования оборудования с ЧПУ различных конструкций для производства валков шаропрокатных станов.

## 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И НАСТРОЙКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

### 4.1. Перспективы автоматизации режима прокатки шаров

В настоящее время технологические режимы шаропрокатных станов автоматизированы, начиная от процессов нагрева в печах, режимов прокатки, термообработки и заканчивая транспортировкой, учетом и складированием металла. Для обеспечения полной автоматизации, каждый процесс должен контролироваться и удаленно управляться, для чего устанавливаются датчики.

Современный уровень автоматизации достигнут на шаропрокатном стане 60-120 нового поколения.

На АО «ЕВРАЗ-НТМК» по сегодняшний день в работе находятся станы 40-80 [108] и стан 80-125 [109], но с учетом непрерывно-растущего спроса, в 2015 году было принято решение о строительстве шаропрокатного стана, оснащенного автоматизированной системой производства и складирования шаров с возможностью производства шаров диаметром от 60 до 120 мм, с твердостью до 5 группы. План расположения оборудования шаропрокатного стана представлен на рисунке 52.

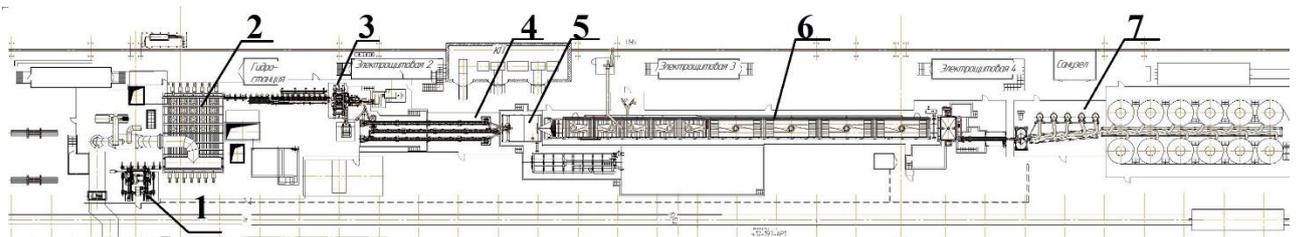


Рисунок 52. План расположения оборудования участка ШПС

1. - стопоразборщик с загрузочным устройством; 2. - нагревательная печь; 3. - стан горячей прокатки 60-120; 4. - установка выравнивания температуры; 5. - закалочная машина; 6. - печь отпуска; 7. - лотковая система сортировки шаров.

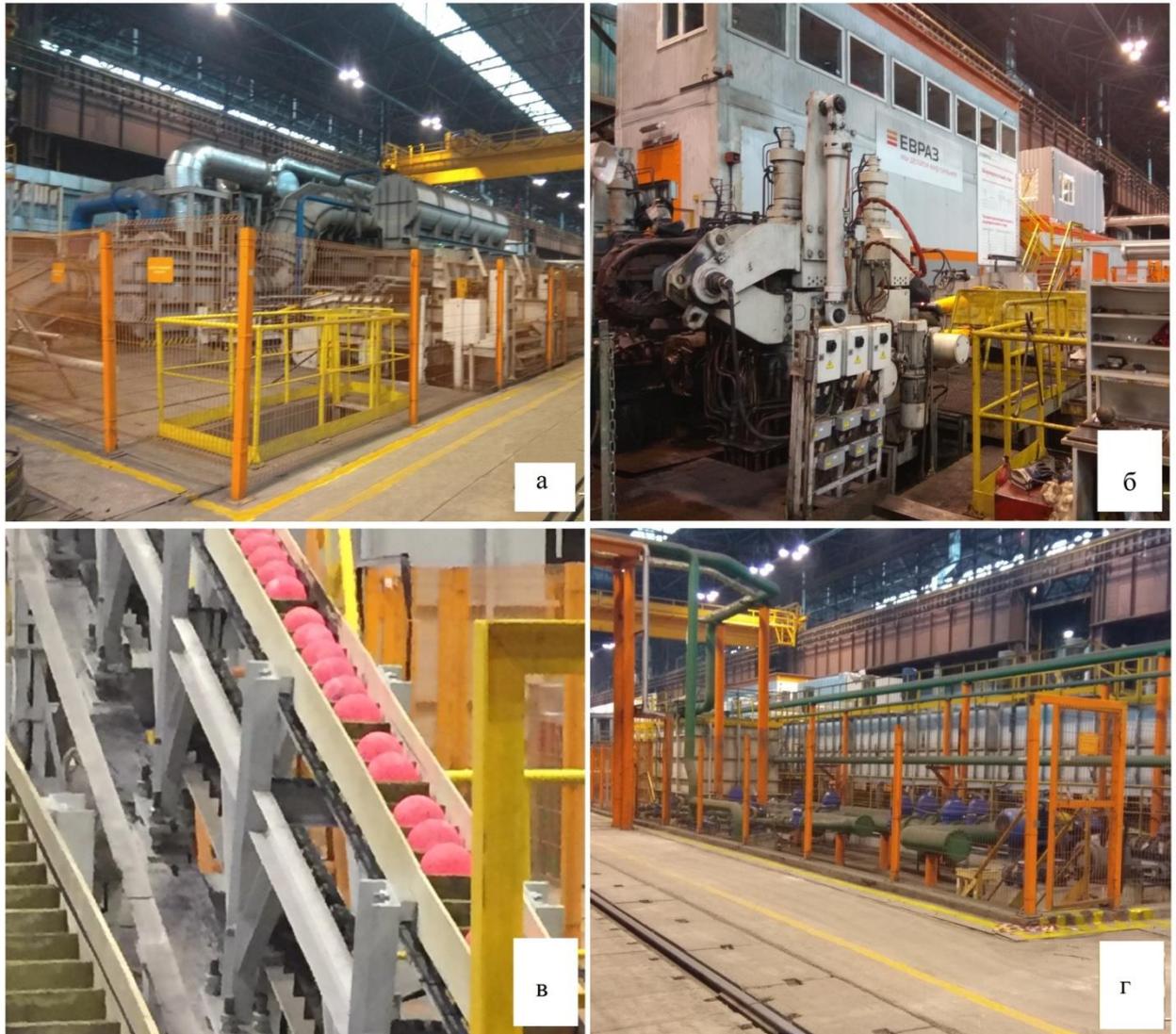


Рисунок 53. Оборудование шаропрокатного участка

- а. - нагревательная печь; б. - рабочая клеть стан горячей прокатки шаров 60-120;  
в. - установка выравнивания температуры; г. - печь отпуска

Среди основного оборудования участка:

- Нагревательная печь (рисунок 52. поз. 2., рисунок 53.а) с транспортировкой заготовки на подинах посредством механизма шагающих балок, использующая в качестве топлива природный газ, имеющая систему автоматической настройки параметров для энергоэффективного режима работы, включая системы регулировки расхода газ-воздух и отвода продуктов отработки газов, а также индивидуальную настройку форсунок.

- Стан горячей прокатки шаров (рисунок 52. поз.3., рисунок 53.б) с гидромеханическими приводами сведения валков, гидравлическим

толкателем, быстросъемными кассетами и направляющими проводками для проведения перевалки менее чем за 40 минут. Система автоматики стана решает задачу как непрерывной прокатки шаров с отделением половинок, так и автоматической настройки стана на заданный профиль с высокой точностью позиционирования рабочих элементов. Элементы рабочей клетки позволяют производить настройку в широком диапазоне регулирования (см. глава 2, табл. 3, стан 60-120). Кроме этого для стана был изготовлен стенд предварительной настройки кассет, позволяющий производить настройку рабочих положений валков заранее до установки их в стан, что также исключает время на дополнительную настройку стана после перевалки;

- Линия термической обработки шаров включает установку выравнивания температур (рисунок 52. поз.4., рисунок 53.в), закалочную машину (рисунок 52. поз.5.) и отпускную печь (рисунок 52. поз.6., рисунок 53.г).

Установка выравнивания температур имеет 3 конвейера с регулировкой скорости транспортировки шаров и переключением с короткого на длинный цикл. Это дает возможность охлаждать шары до необходимой температуры закалки.

Закалочная установка барабанного типа, обеспечивающая непрерывный процесс закалки шаров с автоматической настройкой на заданный режим. Установка имеет возможность регулировки как температуры и расхода воды, за счет применения замкнутого цикла воды с прохождением через градирню, так и регулировку времени нахождения шаров в закалочной среде за счет изменения скорости вращения закалочного барабана.

Отпускная печь, имеющая 5 зон нагрева и 4 зоны выдержки предназначена для снятия внутренних напряжений после закалки и придания высоких эксплуатационных свойств шарам, включая ударную вязкость, которая является одним из важных параметров для нормальной эксплуатации

шаров в шаровых мельницах, испытывающих высокие динамические и ударные нагрузки.

Также участок снабжен лотковой системой автоматической сортировки шаров (рисунок 52. поз.7), сортируя шары не только по диаметру и группе твердости, но и учитывая поплавоочный поток или индивидуальные фабрикации.

Благодаря использованию оборудования участка, отвечающего современным тенденциям, а также применению высокотехнологичных процессов, участок способен производить мелющие шары с условными диаметрами от 60 до 120 мм, твердостью от 2 до 5 группы с высокими механическими свойствами, отвечающими требованиям потребителей.

Одни из основных концептуальных особенностей участка:

1. Использование калибровок валков с непрерывно-изменяющимся шагом и дальнейшим изготовлением валков на 5-координатном обрабатывающем центре с заданной 3-D модели, а также точная настройка всех параметров стана с жесткой фиксацией элементов клетки, в комплексе позволяет обеспечить высокую точность геометрии получаемых шаров;

2. Выбор марок стали целевого назначения, а также строгое соблюдение и контроль температурно-временных параметров по всему этапу от нагрева заготовки до полного цикла термической обработки шара с целью получения шаров с высокими механическими свойствами;

3. Применение систем контроля параметров сред, включающих температурные датчики, расходомеры, автоматизированные клапаны и затворы для газа, воздуха, воды, азота, электроэнергии, что позволяет оптимизировать энергопотребление участка;

4. Применение систем контроля безопасности, включая автоматические блокировки для ограничения доступа персонала, не связанного с технологическим процессом и системы защиты от внезапного проникновения в рабочую зону, предназначенные для безопасности проведения работ на участке

Как большинство современных станов, он оснащен единой системой мониторинга технологических процессов, включая сигнализирование работников участка при отклонении от любых рабочих параметров на выставленных трендах.

Автоматизация связана не только с технологическими параметрами процесса, но также с соблюдением поплавочного потока, с помощью которого, при создании фабрикаций, возможно отследить историю каждого шара: из какой заготовки он был произведен, какие режимы прошел и в какую условную ячейку при сортировке был помещен. Используя данную систему, сортировка происходит автоматически, объединяя условные ячейки в группы и проводя отгрузку партий шаров в соответствии с конкретным заказом. Данная система исключает перемешивание шаров, а также возможность попадания некондиционной продукции в ячейки с годной [110-112].

Несмотря на то, что автоматизация технологических процессов на данном стане достигает высокого уровня, некоторые процессы в силу своей специфики подлежат автоматизации и требуют дальнейших исследований.

К примеру, в процессе прокатки на шаропрокатном стане геометрия шаропрокатных валков не позволяет производить установку тензометрических датчиков для определения точечных напряжений в процессе прокатки для определения общей картины распределения контактных давлений по поверхности валка и выявления слабых мест при настройке стана.

Геометрическая точность получаемых шаров контролируется вручную, после чего производится настройка стана, что носит субъективный характер, и зависит от профессионализма вальцовщика.

Также в процессе закалки шаров контролируется температура воды, температура шаров перед закалкой, время нахождения шаров в закалочном барабане, но отсутствует технологический контроль прокаливаемости, поэтому не всегда существующий технологический контроль может

обеспечить получение продукции, отвечающей критериям твердости (таблица 1). Одной из задач является введение контроля твердости и глубины прокаливания непосредственно в технологический процесс.

Решение данных задач, включая контроль параметров на протяжении всего технологического процесса изготовления шаров, улучшает качество производимой продукции как по геометрическим параметрам, так и по эксплуатационным, например, износостойкость и прочность, которые напрямую зависят от твердости и ударной вязкости изготавливаемых шаров.

#### **4.2. Исследование и совершенствование процесса задачи заготовки в стан**

На условие захвата кроме скорости валков, их диаметров, диаметра заготовки, коэффициентов трения заготовки, массы заготовки и усилия прокатки, создаваемого при захвате, также влияет ширина смятия (при контакте заготовки с валком), и нормальное контактное напряжение на торце штанги.

Для оценки минимально необходимого давления на штанге, используем известное выражение (39) (см.п.2.2.) для определения условия захвата [86].

Для осуществления нормального захвата, усилие, создаваемое толкателем, должно быть выше минимально-допустимого порога значений, а кроме этого создавать необходимое смятие между валками и заготовкой в процессе захвата (см. рисунок 47.а). Ширина смятия в данном случае будет зависеть от минимально-допустимой ширины реборды в зоне захвата, поэтому оставшимся условием будет являться нормальное контактное напряжение, создаваемое на торце штанги.

Выразим значение контактного напряжения из известного уравнения [50] (которое было уже использовано в п.2.2. в выражении из него окружного

ускорения как уравнение (1), где расшифрованы все символы), создаваемого на торце штанги (34):

$$p_{ш} > \frac{3Nr \left[ \mu m_T - \frac{1}{2} (1 + i) \xi_c \right] - 3\Omega \frac{r^2}{2} G}{2\pi f \rho_0^3}. \quad (34)$$

Исходя из условия (34), можно сделать вывод, что при контактном напряжении ниже требуемого, при прочих равных условиях, будет происходить отсутствие захвата заготовки.

Такое может наблюдаться на шаропрокатных станах 40-80 и 80-125, где установлены толкатели с пневматическими плунжерами и рабочим давлением воздуха 6 атмосфер. При падении давления в системе в 2-2,5 раза, которое может произойти по различным причинам (утечка воздуха, скопление конденсата в распределительных системах и т.д.), происходит отсутствие захвата (образование «карандашей»).

Шаропрокатный стан 60-120 [111, 112] оснащен толкателем с гидравлическим плунжером. Высокое давление гидравлического привода позволило исключить ситуацию отсутствия захвата.

В процессе захвата заготовки толкатель перемещает её в валки со скоростью теоретической осевой задачи. Возрастание давления в системе при создании сопротивления перемещению штока зависит от характеристик гидравлического насоса, т.к. система гидропривода замкнутая. При касании заготовкой реборды валка, возрастает сопротивление подачи и, соответственно, рост давления в плунжере, вплоть до общего давления в системе (180 атмосфер). Повышенное давление деформирует заготовку, конец которой закатывается в полусферу (не полностью сформированный шар).

Половинки с передней части заготовки, являющиеся концевой обрезью, автоматически удаляются в процессе прокатки (рисунок 54.б), что значительно увеличивает расход металла. В условиях шаропрокатного стана

60-120 при диаметре штока толкателя 100 мм, необходимое рабочее давление  $p$  составит:

$$p > \frac{p_{\text{ш}}}{\pi r_n^2}, \quad (35)$$

где  $r_n$  – радиус плунжера цилиндра толкателя



а

б

Рисунок 54. Изображение половинки:

а. - при нормальном условии захвата, б. - при повышенном давлении в толкателе

В таблице 9 представлены допустимые значения давления, необходимые для гарантированного осуществления захвата заготовки валками.

Таблица 9. Допустимое расчетное давление в цилиндре толкателя шаропрокатного стана 60-120 для обеспечения гарантированного захвата заготовки

Диаметр шара, мм	Допустимое давление МПа (атм.)
60	1,1 (10,5)
70	1,2 (12)
80	1,4(14)
90	1,6 (15,5)
100	1,7 (17)
110	1,9 (19)
120	2,1 (21)

На основании данных таблицы 9 предложено на входе магистрали гидроцилиндра толкателя установить регулятор давления и датчик давления. Автоматически определять и задавать необходимое давление в зависимости от диаметра заготовки, обеспечив гарантированный захват заготовки, но при этом уменьшив размеры образованных половинок с переднего конца заготовки [113].

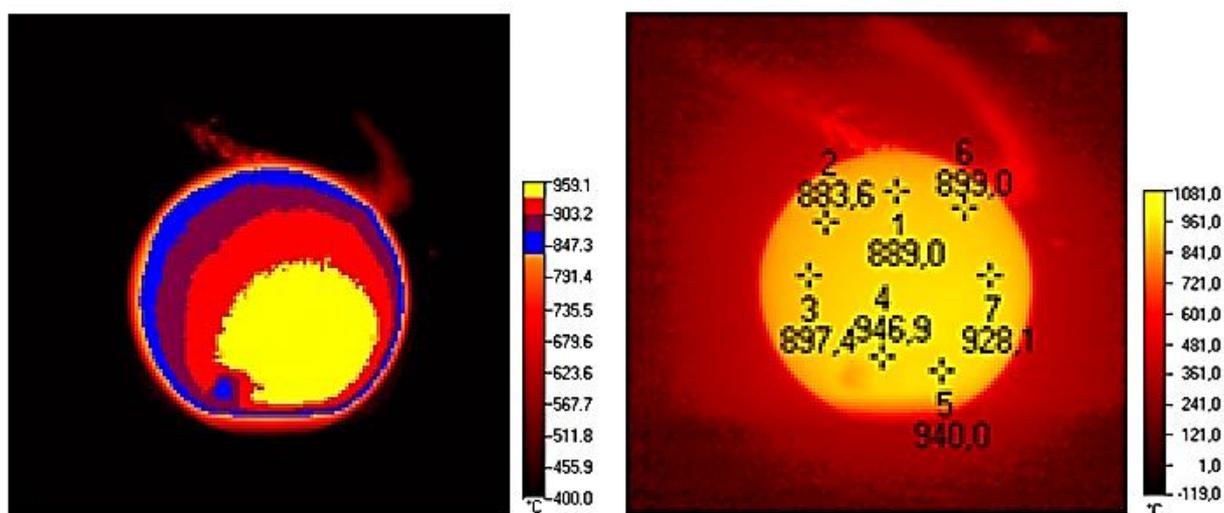
Таким образом, аналитически получены минимально-допустимые значения давления в толкателе от 1,1 до 2,1 МПа в зависимости от диаметра заготовки (для всего сортамента производимой продукции) для обеспечения её захвата. Было установлено, что повышенное давление в толкателе приводит к увеличению размеров половинки, это увеличивает расход металла. Автономный регулятор с использованием расчетных данных обеспечивает гарантированный захват заготовки, при этом уменьшив объем концевой обреза.

### **4.3. Оценка контактных давлений**

Распределение температуры на поверхности деформируемой заготовки зависит от контактных давлений. Исследование температурных полей и расчет контактных давлений при прокатке мелющих шаров производился в процессе производства шара условным диаметром 60 мм. Размеры заготовки составляли: длина 6 м, диаметр 60 мм, материал – сталь условной марки ШЗ-Г химический состав: С-0,7-0,75%, Si-0,17-0,37%, Mn-0,9-1,2%, S<0,025%, P<0,025%. Температура заготовки перед подачей в клеть составляла 1010-1120°C и определялась по показаниям пирометра SEMDT-8833 480717 с точностью измерения  $\pm 2^\circ\text{C}$ , при температурах <1370°C. Температурное поле на поверхности шара после прокатки на выходе из стана измерялось при помощи тепловизора Fluke Ti 400 с погрешностью измерения  $\pm 2^\circ\text{C}$  при диапазоне измеряемых температур < 1200°C.

В последнее время, согласно публикациям [1, 27, 38, 42, 46, 114, 115], осуществляются попытки расчета температур и усилий прокатки при помощи симуляции процесса прокатки шаров в программных комплексах Q-Form, Deform 3D, Super Form, и т.п., однако экспериментальные подтверждения расчетных параметров на настоящий момент отсутствуют. Поэтому чаще всего производится аналитический расчет усилий при поперечно-винтовой прокатке мелющих шаров согласно методике [18]. По данной методике определяется площадь контактной поверхности между валками и заготовкой в различные моменты прокатки и среднее контактное давление, затем рассчитывается общее усилие прокатки. Методика предполагает учёт распределения усилий по длине бочки валка на участках обжатия, однако распределение контактных давлений на каждом из участков (расчетных площадей контакта) не предусмотрено.

Целью данного исследования является определение неравномерности контактных давлений, определяемых из разности температур по поверхности шара после прокатки, а также критерии зависимости данных параметров.



а.

б.

Рисунок 55. Температура шара после прокатки на выходе из стана  
а – распределение температурных полей; б - численные значения температур в различных точках поверхности шара.

Как показали исследования распределения температурных полей, на поверхности шара непосредственно после прокатки (рисунок 55). выявляется существенное повышение температуры от пояска к полюсам с  $880^{\circ}\text{C}$  до  $940^{\circ}\text{C}$ . Обнаруженный прирост температуры (до  $60^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается в области внедрения реборды валка в заготовку, где происходят значительные деформации. Предлагается, учитывая изменение температур при прокатке, теоретически установить изменение усилий обжатия в конкретных точках и определить распределение усилий обжатий по поверхности шара с возрастанием от пояска к полюсам (Рисунок 56).

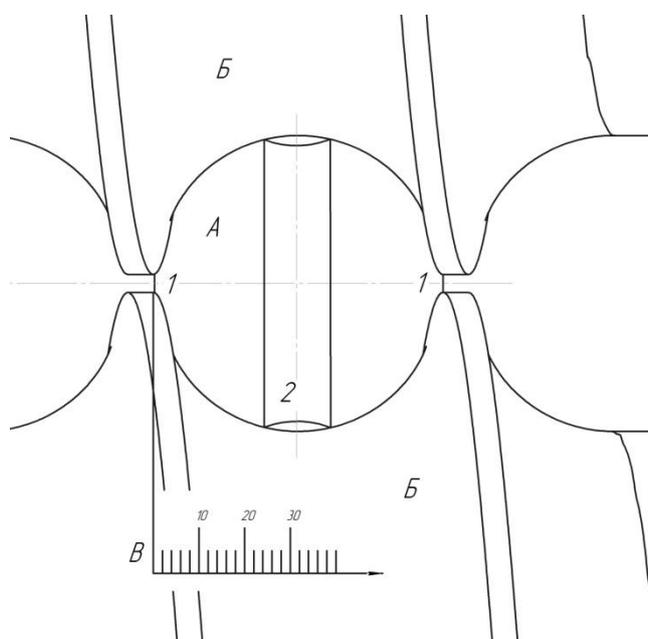


Рисунок 56. Схема расположения шара и инструмента относительно инструмента деформации на выходе из клетки

А.- шар, 1- полюс; 2- поясок (экватор); Б. – инструмент деформации (прокатные валки), В. - условная шкала удаления расчетной точки от полюса шара.

Известно, что потеря температуры происходит за счет конвекционного тепловыделения, излучения и контактной потери тепла с валками, а приращение тепла – за счет энергии пластического формоизменения в очаге

деформации. Изменение температур в ходе прокатки, определяемое по методике [116], составит:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{\text{и}} - \Delta t_{\text{к}} - \Delta t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{д}}, \quad (36),$$

где

$t_{i-1}$  - температура начального нагрева заготовки, °С

$\Delta t_{\text{и}}$  - потери температуры заготовки за счет излучения тепловой энергии, °С.

$\Delta t_{\text{к}}$  - потери температуры заготовки за счет конвективного теплообмена полосы с окружающей средой, °С.

$\Delta t_{\text{в}}$  - потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками, °С.

$\Delta t_{\text{д}}$  - разогрев полосы за счет энергии пластического формоизменения в очаге деформации, °С.

Потеря температуры заготовки за счет излучения тепловой энергии в межклетевом промежутке определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$\Delta t_{\text{и}} = \frac{C_p \cdot F \cdot \tau}{G \cdot c} \cdot \left[ \left( \frac{t_{i-1} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (37)$$

где  $G$  - масса металла заготовки, кг

$\rho$  – плотность материала заготовки, кг/м<sup>3</sup>

$\tau$  - время прокатки, с

$c$  - теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·°С).

для стали  $c = 0,228 \cdot t + 455$ .

$t_c$  - температура окружающего воздуха, °С

$C_p$  - приведенный коэффициент излучения системы взаимоблужающихся тел.

$$C_p = \xi \cdot C_0, \quad (38)$$

где  $\xi$  – степень оптической чистоты поверхности,

$C_0$  - постоянная Стефана-Больцмана.

$$\Delta t_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot F \cdot \tau (t_{i-1} - t_c)}{G \cdot c}, \quad (39)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи между металлом и окружающей средой, Вт/(м<sup>2</sup>·°C),

$$\alpha_k = \frac{N_{\text{н}} \lambda_b}{d_p}, \quad (40)$$

где  $N_{\text{н}}$  - критерий Нуссельта

$\lambda_b$  - коэффициент теплопроводности воздуха,

$d_p$  - приведенный диаметр заготовки

Критерий Нуссельта при отношении ширины раската к высоте, равной единице, определяется по следующим зависимостям:

$$N_{\text{н}} = \begin{cases} 0,52 \cdot R_e^{0,47} \cdot \varphi, R_e \in [10, 1000] \\ 0,18 \cdot R_e^{0,62} \cdot \varphi, R_e \in [1000, 100000] \end{cases}, \quad (41)$$

где  $\varphi$  - функция угла атаки полосы воздушным потоком,

$R_e$  - критерий Рейнольдса

$$R_e = \frac{v \cdot d_p}{\nu_b}, \quad (42)$$

где  $v$  - скорость перемещения заготовки,

$\nu_b$  - кинематическая вязкость воздуха.

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\alpha_b \cdot F_n \cdot \tau (t_{i-1} - t_b)}{G_d \cdot c}, \quad (43)$$

где  $\alpha_b$  - коэффициент теплоотдачи между заготовкой и рабочими валками, Вт/(м<sup>2</sup>·°C)

$$\alpha_b = \frac{\lambda_c}{d_p}, \quad (44)$$

где  $\lambda_c$  - коэффициент теплопроводности стали,

$F_n$  - полная площадь контакта металла с рабочими валками в очаге деформации,

$\tau$  - время контакта заготовки с валками,

$G_d$  - масса металла, находящаяся в очаге деформации, в зависимости от длины рабочей поверхности валка,

$t_{i-1}$  - температура заготовки, при входе в клеть,

$t_b$  - температура рабочих валков,

$$\Delta t_d = \frac{p \cdot \varepsilon}{c \cdot \rho}, \quad (45)$$

где  $p$  – контактное давление

$\varepsilon$  - логарифмическая степень деформации

Прирост температуры, определяемый по формуле (45) на шаре происходит за счет разогрев полосы за счет энергии пластического формоизменения в очаге деформации. Все остальные процессы приводят к потере температуры. Из уравнения теплового баланса (36) и уравнения прироста температур за счет разогрев полосы за счет энергии пластического формоизменения в очаге деформации (45), выражаем величину контактного давления  $p$ :

$$p = (t_i - t_{i-1} + \Delta t_k + \Delta t_n + \Delta t_b) \frac{c\rho}{\varepsilon}. \quad (46)$$

В таблице 10 представлены исходные данные для расчета.

Таблица 10. Экспериментальные данные при опытной прокатке

Наименование	Обозначение	Значение
Температура нагрева заготовки, °С	$t_{i-1}$	1010
Приведенный диаметр заготовки, м	$d_p$	0,06
Длина заготовки, м	$L$	6
Излучающая поверхность заготовки, м <sup>2</sup>	$F$	1,137
Масса заготовки, кг	$G$	132,5
Время процесса прокатки, с	$\tau$	55
Температура окружающего воздуха, °С	$t_c$	20
Степень оптической чистоты поверхности для низколегированной стали	$\xi$	0,85
Функция угла атаки полосы воздушным потоком, при прокатке	$\varphi$	0,5
Скорость перемещения заготовки, м/с	$v$	0,18
Полная площадь контакта металла с рабочими валками в очаге деформации, м <sup>2*</sup>	$F_n$	0,00601
Длины рабочей поверхности валка, м	$l$	0,35
Масса металла, находящаяся в очаге деформации, кг	$G_d$	7,73
Температура рабочих валков, °С	$t_b$	80...120
Логарифмическая степень деформации	$\varepsilon$	1

\*Для полной площади контакта металла с рабочими валками в очаге деформации приводится расчетное значение

Плотность материала для круглой заготовки из стали ШХ-3Г принята  $\rho=7810$  кг/м<sup>3</sup>

Кинематическая вязкость воздуха при 20°C принята  $\nu_b=18,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

Коэффициент теплопроводности материала заготовки принят  $\lambda_c=47$  Вт/м·К

Коэффициент теплопроводности воздуха, при 293К принят  $\lambda_b=0,0259$  Вт/м·К

Находим  $p$  для каждой температуры из рисунка 55 и получаем зависимость распределения контактного давления по удалению от полюса шара (рисунок 57).

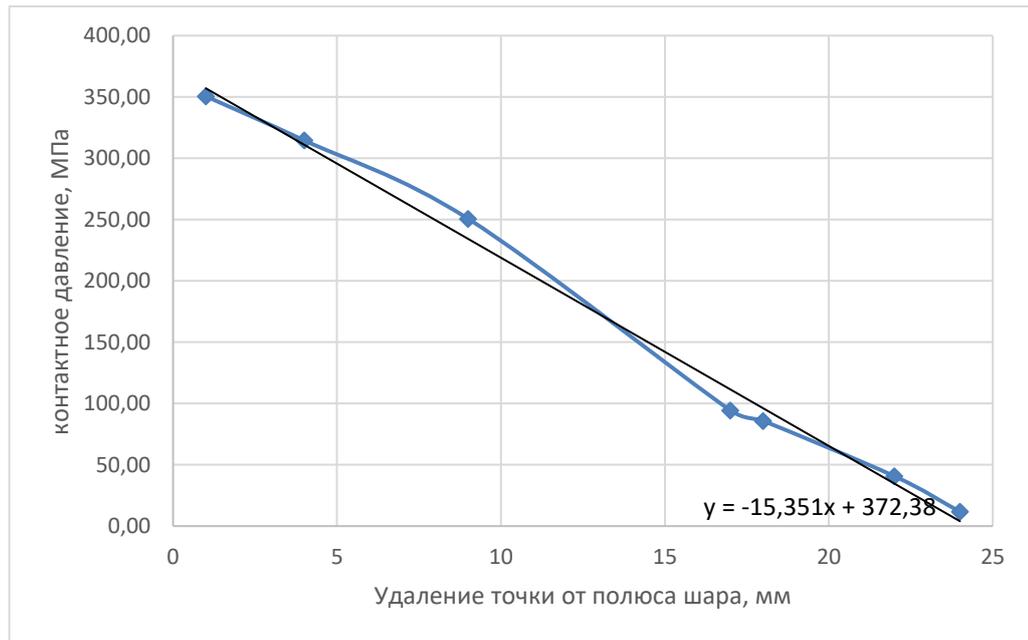


Рисунок 57. Зависимости распределения контактного давления по удалению от полюса

Как следует из графика, максимальное обжатие приходится на полюс шара, что соответствует расчетному контактному давлению 350 МПа. Контактное давление снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации и практически сводится к нулю на пояске шара, что показывает отсутствие обжатий в данной зоне [117].

Таким образом, выявлено существенное повышение температуры шара при поперечно-винтовой прокатке от пояска к полюсам с 880°C до 940°C. Обнаруженный прирост температуры (до 60°C) наблюдается в области внедрения реборды вала в заготовку, где происходят значительные

деформации. По точечным температурам поверхности шара на выходе из клетки аналитически определено распределение контактных давлений. Максимальное контактное давление при производстве шара Ø 60 мм составляет 350 МПа и линейно снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации, причем практически сводится к нулю на пояске шара. Визуализация температурных полей в процессе прокатки позволяет оперативно производить настройку стана с обеспечением необходимых геометрических параметров между валками, тем самым снижая локальные напряжения.

#### **4.4. Получение шаров повышенной точности**

ГОСТ 7524-2015 задает требования к форме мелющих шаров [63]. Предельные отклонения размеров, объём и масса шаров обусловлены параметрами, представленными в таблице 2. (см. п 1.2). Также согласно ГОСТ 7524-2015 допускаются любые дефекты, не выходящие за размеры предельных отклонений шара.

Однако при производстве шаров 4 и 5 групп (особо высокой твердости и объемной твердости) такие дефекты могут являться концентраторами напряжений, приводящих к разрушению после закалки.

Для уменьшения концентраторов напряжений, предлагается разделить номенклатуру шаров на две группы: шары с обыкновенной точностью (в соответствии с таблицей 2) и шары с повышенной точностью. Для того, чтобы определить допустимые предельные отклонения для предлагаемых групп шаров, рассмотрим факторы, влияющие на получение шара заданной геометрии.

Согласно проведенным исследованиям, точность получаемых шаров связана с технологией изготовления валков, применяемой калибровкой, техническими характеристиками используемого оборудования и с качеством настройки самого стана.

Относительная погрешность изготовления равна отношению абсолютной погрешности изготовления к опорному значению величины. Для оценки факторов, влияющих на точность производства шаров, предложено аналитическое выражение для расчета суммарной относительной погрешности при изготовлении.

$$\Delta_{\text{общ}} = \sum \Delta_i = \Delta_{\text{вал}} + \Delta_{\text{настр}} + \Delta_{\text{и.ш.}}, \quad (47)$$

где  $\Delta_{\text{вал}}$  – погрешность, обусловленная качеством изготовления инструмента деформации,

$\Delta_{\text{настр}}$  – погрешность настройки стана

$\Delta_{\text{и.ш.}}$  – погрешность измерений

$$\Delta_{\text{вал}} = \Delta_{\text{кал}} + \Delta_{\text{изг}} + \Delta_{\text{и.в.}}, \quad (48)$$

где  $\Delta_{\text{кал}}$  – относительная погрешность, вызванная использованием метода калибровки (погрешность, обусловленная несовершенством метода калибровки).

Рассмотрим влияние слагаемых, входящих в выражения (47) и (48).

Величина погрешности зависит от размеров бочки шаропрокатных валков [57] с рекомендуемым параметром диаметра бочки валка, равным 5-6 диаметров прокатываемого профиля и от метода калибровки. Для получения шаров повышенной точности предпочтительна калибровка валков с непрерывно-изменяющимся шагом (см. главу 3), в результате чего получены шары диаметром, равным  $125 \pm 0,4$  мм.

Результаты были получены в «идеальных» условиях: при наличии инструмента деформации, имеющего минимальные отклонения от номинальной формы, и тщательно настроенного оборудования стана. Относительная погрешность изготовления, зависящая от применяемой калибровки, при этом составит:  $\Delta_{\text{кал}} = 0,0064d_{\text{ш.}}$ , где  $d_{\text{ш.}}$  – диаметр шара.

В условиях реального производства на относительную погрешность изготовления влияют: точность оборудования, на котором изготавливают валки, качество оснастки и инструмента. Например, при изготовлении валков

на токарно-винторезных станках групп 1-Н65 и прочих аналогах, абсолютная погрешность профиля рабочей формообразующей поверхности инструмента деформации (валка диаметром 700 мм, который является наиболее распространенным для производства шаров с условным диаметром 120 мм) может достигать  $\pm 2$  мм. При изготовлении валков на 5-координатных обрабатывающих центрах, типа NORMA L-45 (см. рисунок 5), абсолютная погрешность составляет всего  $\pm 0,5$  мм. Применение высокоточного оборудования позволит произвести изготовление валков с точностью, допускаемой для получения профиля повышенной точности шаров. Относительная погрешность изготовления при этом будет равна  $\Delta_{\text{изг}}=0,008d_{\text{ш}}$ .

Погрешность измерения параметров изготовленного валка будет зависеть от средств измерений, которые при этом используются.

Традиционно контроль параметров изготовленного валка выполняется дифференцированным методом средствами допускового контроля (шаблонами). При этом некоторые параметры: шаг винтовой линии, соосность диаметров, радиусы сопряжения, контролировать в полной мере не удастся. Поэтому такой метод не приемлем для качественного контроля валков, предназначенных для получения шаров повышенной точности.

Для контроля валков предлагается применять мобильную контрольно-измерительную машину КИМ (измерительная рука от компании FARO или от компании ROMER).

На рисунке 58 изображены данные, полученные измерением «*FAROARM*».

Относительная погрешность при измерениях валка данным средством измерений составит:  $\Delta_{\text{и.в.}}=0,00056d_{\text{ш}}$

Более точное измерение с погрешностью до 0,012 мм в абсолютной величине с возможностью измерения всей рабочей поверхности, можно получить, используя 3-D сканер абсолютного измерения (рисунок 59).

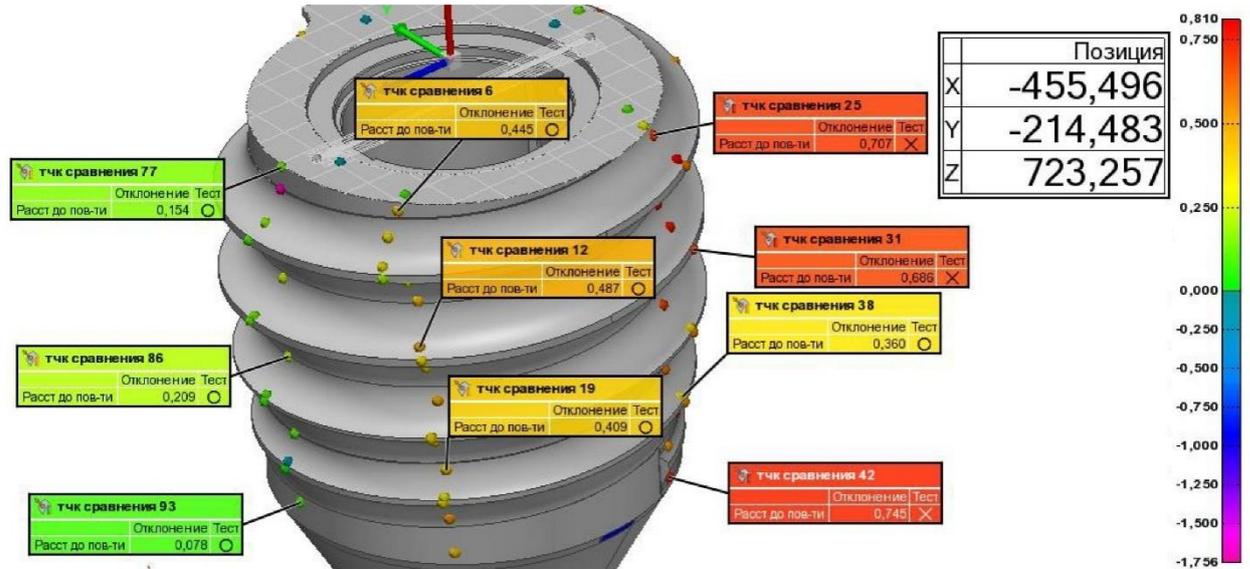


Рисунок 58. Результаты измерения «FAROARM» шаропрокатного валка

Учитывая все составляющие погрешности, суммарная относительная погрешность инструмента деформации по формуле (48) составит:  $\Delta_{\text{вал}}=0,01496d_{\text{ш}}$ .

Погрешность настройки стана ( $\Delta_{\text{настр}}$ ) зависит от системы управления станом и жесткости стана, а также от соответствия настроек монтажной схеме прокатки. Для станов с ручным, механическим и электро-механическим приводом, точность настройки зависит от точности координации данных механизмов. На шаропрокатном стане 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК» установлено дистанционное автоматическое управление электро-механических приводов с гидравлическими зажимами, что обеспечивает настройку с точностью 0,1 мм для горизонтального сведения валков и 0,01° для ориентации вертикального наклона валков (рисунок 60).

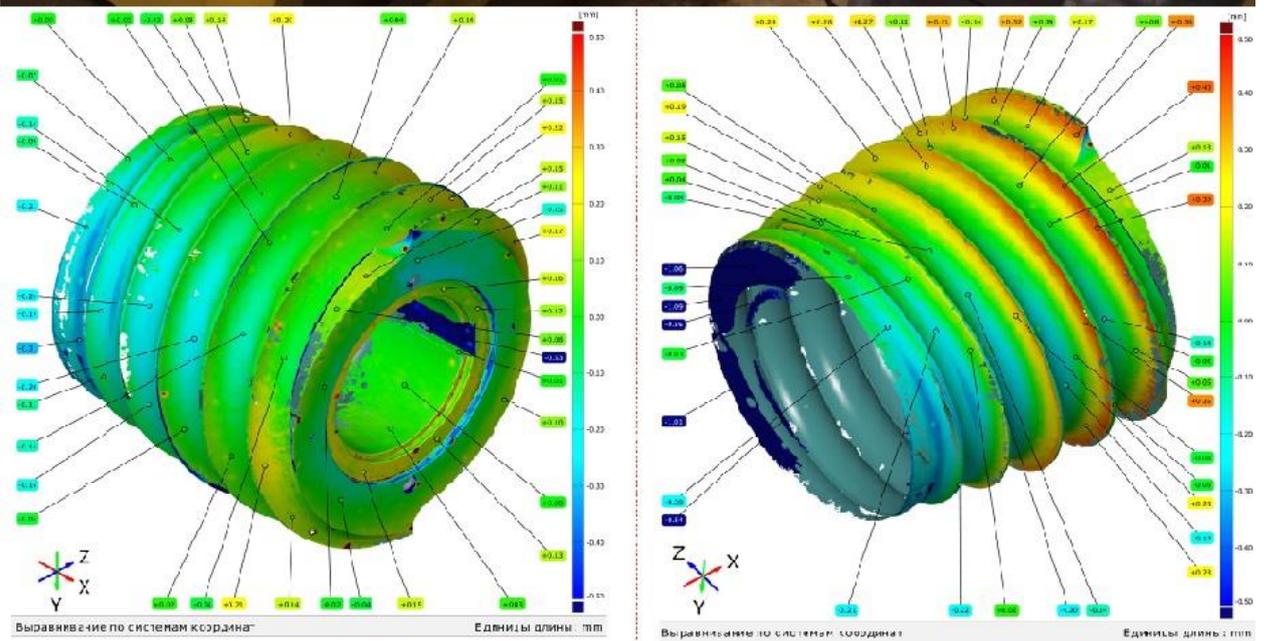


Рисунок 59. 3-D сканирование шаропрокатного валка

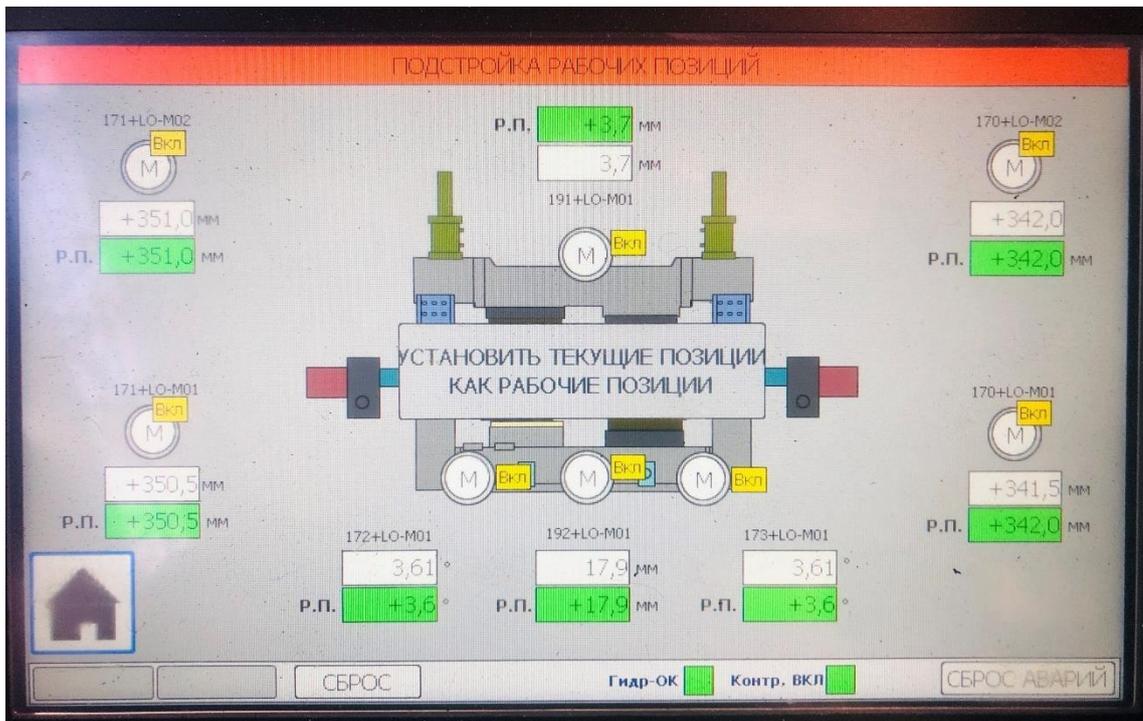


Рисунок 60. Touch-panel шаропрокатного стана 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК»

Линейная точность при длине бочки валка 600 мм (для получения шара условного диаметра 120 мм) составит:  $\Delta_{\text{верт}}=600 \cdot \text{tg}0,01^\circ=0,1\text{мм}$ , соответственно, точность углового сведения и горизонтального составит 0,1 мм. Тогда наибольшая абсолютная погрешность составит

$$\Delta_{\text{настр.абс.}} = \sqrt{\Delta_{\text{верт}}^2 + \Delta_{\text{гор}}^2}, \quad (49)$$

$$\Delta_{\text{настр.абс.}}=0,1414.$$

Относительная величина настройки для номинального размера шара 125 мм составит  $\Delta_{\text{настр}}=0,00113d_{\text{ш}}$ .

Погрешности измерений универсальных средств измерений нормированы в рабочем документе РД 50-98-86 «Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051-81)» [118-119]. Нормированные погрешности измерений охватывают не только погрешности средств измерений, но и составляющие от других источников погрешности, оказывающих влияние на погрешность измерения (установочные меры, базирование, температурные

деформации, измерительные усилия и т.д.). Для измерения шаров предлагается применять гладкие микрометры по ГОСТ 6507-90 [120]. Согласно РД 50-98-86 [119], абсолютная погрешность измерения шара с условным диаметром 120 мм гладким микрометром, находящимся в руках, равна 0,15 мм. Тогда относительная погрешность измерения шаров повышенной точности будет составлять  $\Delta_{и.ш.}=0,0012d_{ш.}$

Подставляя в формулу (47) полученные значения, определим максимальные значения погрешности для шаров повышенной точности.

$$\Delta_{общ}=0,01729d_{ш.}$$

Параметры окружающей среды несущественно влияют на конечный результат и суммарно не будут превышать значение 0,1 мм.

Таблица 11. Предельные отклонения размеров мелющих шаров нормальной и повышенной точности

Условный диаметр, мм	Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение по номинальному диаметру, мм	
		Обыкновенной точности	Повышенной точности
15	15,0	±1,0	±0,5
20	20.0 <sup>1</sup> (20.8 <sup>2</sup> )		
25	25.0 <sup>1</sup> (26.0 <sup>2</sup> )		
30	31.5	±2,0	±1,0
40	41.5		
50	52.0	±3,0	±1,5
60	62.0		
70	73.0		
80	83.0		
80	83.0	±4,0	±2,0
90	94.0		
100	104.		
110	114.0	±5,0	±2,5
120	125.0		

Ключевое влияние на погрешность оказывает диаметр заготовки [121, 122]. В формуле (52) он не был учтен, т.к. данный параметр, регламентированный ГОСТ 2590-2006 [123], является независимым, но при

этом оказывающий наибольшее влияние. Учитывая все вышесказанное, составим таблицу 11, разбив предельные отклонения на 2 группы [124].

Итак, установлено, что общая погрешность геометрических размеров производимых шаров складывается из погрешности, обусловленной качеством изготовления инструмента деформации, погрешности настройки стана и погрешности измерений. Анализ технологических воздействий на каждом этапе позволил существенно уменьшить общую погрешность. Наибольшее влияние на предельные отклонения диаметра во всём сортаменте шаров, оказывает допуск на диаметр и овальность заготовки для прокатки шаров, регламентированная ГОСТ 2590-2006, которая более чем в 2 раза выше допуска на производимые шары. Предложено по параметру геометрической точности разбить мелющие шары на две категории (обыкновенной и повышенной точности), и в дальнейшем при производстве шаров 4 и 5 групп твердости, для гарантированного исключения их дальнейшего разрушения, использовать шары «повышенной точности».

#### **4.5. Экспресс - контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров**

В промышленных условиях контроль твердости выборочной партии производится на твердомере по методу Роквелла. При определении твердости шаров четвертой группы, шар разрезают и производят замер параметров на глубине  $1/2$  радиуса и в центре шара. Данный метод контроля производится в лабораторных условиях в связи с технологией разрезки шара для сохранения внутренней структуры и получения точных значений контролируемых параметров.

После закалки и самоотпуска производится отбор продукции, опытная партия которой направляется в лабораторию для проведения замеров. Результаты контроля становятся известными не менее чем через 3-6 часов после начала производства шаров, в связи с чем, часть произведенной

продукции может оказаться некондиционной. Актуальной задачей является разработка способа оперативного контроля эксплуатационных свойств шаров, особенно важных для четвертой группы.

В качестве обобщенного критерия качества, для экспресс - методики предложено использование акустических свойств, возникающих вследствие внешних механических воздействий и находящихся в корреляции с твердостью и глубиной закаливаемого слоя.

Для проведения исследования, партия из десяти шаров условным диаметром 60 мм из стали Ш-3Г (рисунок 61.) непосредственно после прокатки на стане (с начальной температурой 940°С), была помещена в резервуар с водой температуры 20°С, для закалки. Шары были выдержаны в водной среде от 0 до 3600 секунд, получив разную степень закалки (таблица 12), и извлечены для самоотпуска.



Рисунок 61. Партия шаров условным диаметром 60 мм с разными режимами закатки и самоотпуска

После этого на специальном устройстве возбуждения акустических колебаний (рисунок 62.) произведено звукоизвлечение поочередно с каждого шара с записью параметров звуковых колебаний. Графики звуковых колебаний зафиксированы при помощи программной среды Sound Forge Pro 11, с максимальной частотой 96 кГц и тактовой частотой звукового потока 32 бит, и представлены на рисунке 63.

Далее шары были разрезаны, и проведен замер твердости каждого шара на поверхности, на глубине  $1/2$  от радиуса шара и в центре шара. Все параметры: твердость, выдержка, частота основного тона в момент атаки звука, представлены в таблице 12.

Как показано в работах [125, 126], в диапазоне промежуточных частот (сотни кГц) нелинейность структурных дефектов ведет к развитию параметрической неустойчивости колебаний акустических резонаторов и генерации кратных субгармоник. Низкочастотные (сотни Гц - десятки кГц) колебания дефектной области сопровождаются эффективной генерацией высших гармоник вследствие контактной акустической нелинейности.

Исследования графиков колебаний показали, что при закалке на 4 группу твердости, когда глубина прокаливания значительно увеличивается, частота меняется с 1320 Гц на 1472 Гц, что составляет для данных параметров целый музыкальный тон и характеризует соответствующее звучание, при этом звук становится более звонким, что отражает появление нелинейных гармонических колебаний более высокой частоты, которые накладываются на основной тон.

Также следует отметить, что усилие и скорость воздействия маятникового ударника влияют только на амплитуду колебаний при сохранении параметров частоты.

Для данного метода контроля предлагается использовать автоматическую электронно-акустическую фиксацию частот, а так как получаемый аналитический эффект составляет значительный диапазон частот между

группами твердости шаров, то возможность ошибки измерения сводится к минимуму.

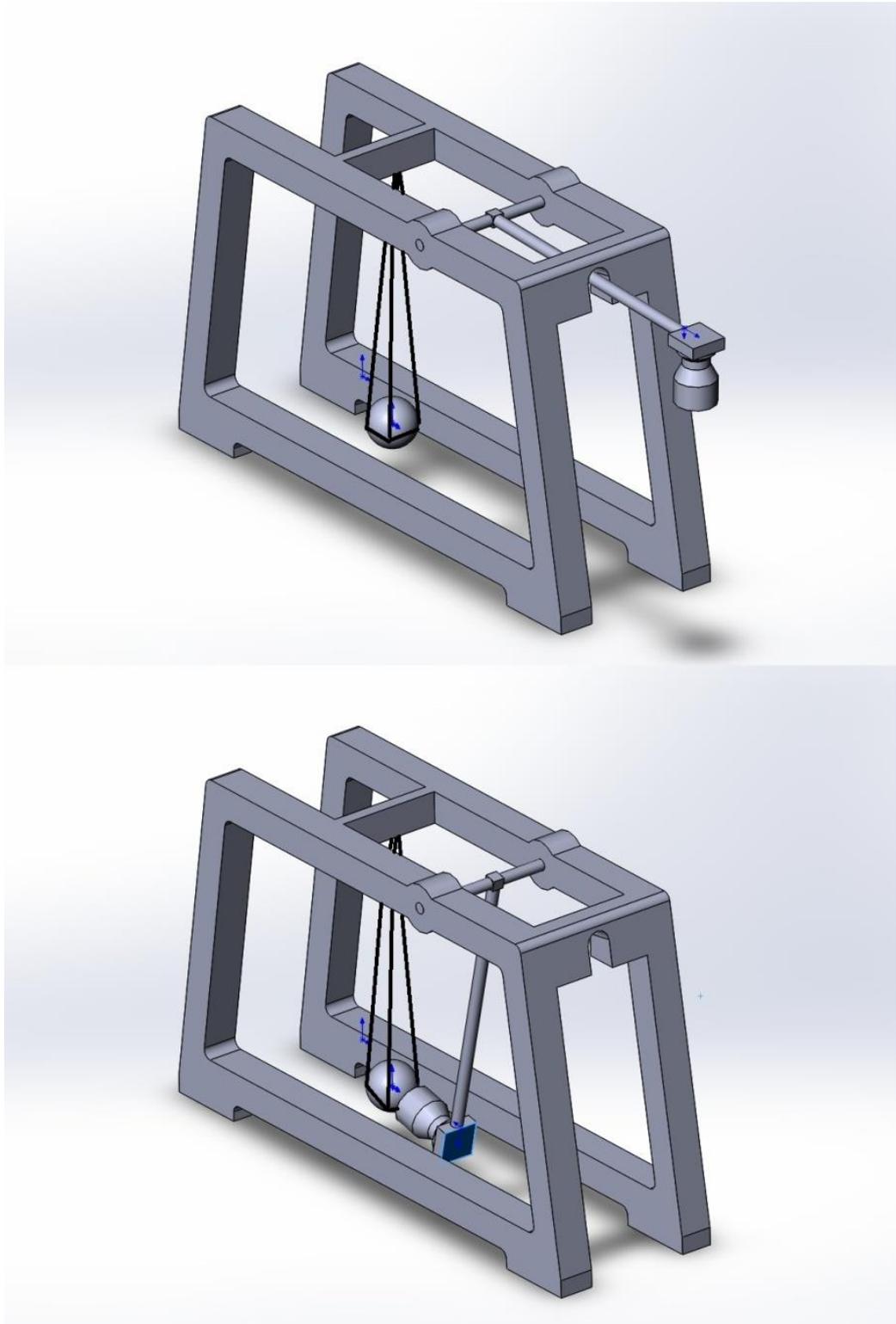


Рисунок 62. Устройство возбуждения акустических колебаний от шаров

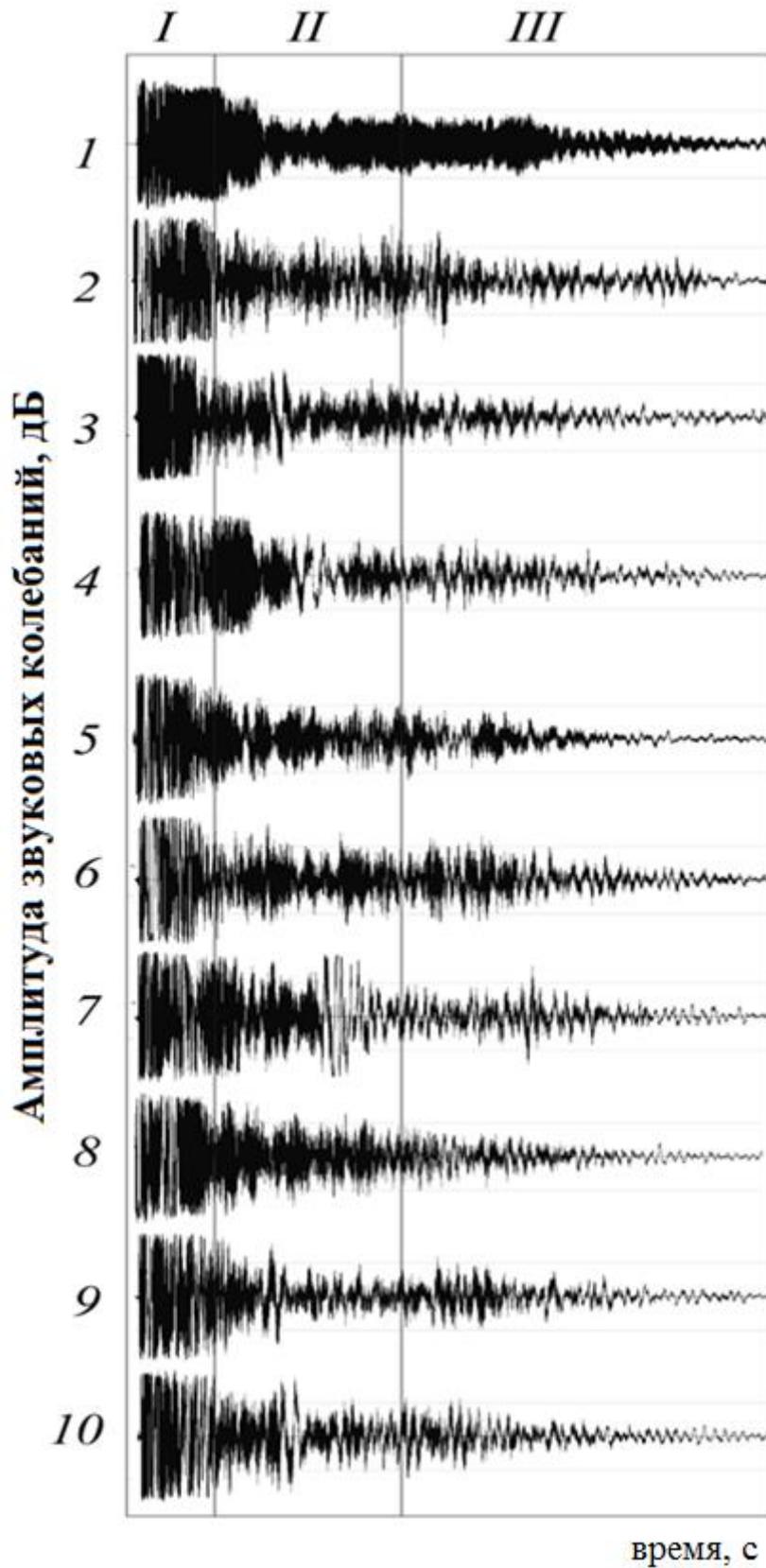


Рисунок 63. Графики звуковых колебаний закаленных шаров (I - зона атаки звука, II - зона накопления гармонических колебаний, III - зона затухания колебаний), цифры 1...10 номера режимов испытываемых шаров

Таблица 12. Параметры шаров в опыте

№ шара	Время выдержки в воде, с	Твердость (HRC)			Группа твердости	Акустическая частота (Гц)	Соответствие музыкальной ноте, октаве
		На поверхности	На 1/2 радиуса	В центре шара			
1	0	-	-	-	-	1206	Ре (3)
2	2	19	-	-	-	1216	Ре-диез (3)
3	4	27	-	-	-	1215	Ре-диез (3)
4	10	44	20	-	1	1247	Ре-диез (3)
5	20	52	36	19	2	1291	Ми (3)
6	30	56	39	29	3	1320	Ми (3)
7	60	58	51	49	4	1472	Фа-диез (3)
8	300	61	53	51	4	1472	Фа-диез (3)
9	1200	61	56	54	4	1486	Фа-диез (3)
10	3600	61	56	54	4	1481	Фа-диез (3)

Минимальное время на данный метод контроля позволяет оперативно воздействовать на процесс производства и вносить коррективы в технологию термической обработки шаров [127, 128].

Таким образом, в данном опыте:

- установлена корреляция эксплуатационных свойств шаров (твердости и глубины прокаливания), определяющих качество продукции (группу твердости), и акустических колебаний, вызываемых внешним механическим воздействием;

- значения частоты основного тона в момент атаки звука для разных групп шаров имеют достаточно большой диапазон (между 3 и 4 группой составляет более 150 Гц) и могут надежно регистрироваться измерительными приборами и являться критерием для классификации изделий по группам твердости;

Данный способ может быть рекомендован как экспресс - контроль шаропрокатного производства с возможностью оперативного регулирования технологического процесса закалки и увеличению выхода годной продукции и быть автоматизирован при установке акустического датчика в технологическую линию.

#### **4.6. Совершенствование производства шаров 5 группы**

В последние годы на рынке мелющих шаров появилось значительное количество компаний, предлагающих шары 5 группы твердости, но, в большинстве случаев, это шары сортамента диаметром до 50 мм [129-133]. Производители 5 группы шаров, диаметром более 100 мм, изготовленных с прокатного нагрева, на мировом рынке полностью отсутствуют. Данная группа характеризуется объемной прокаливаемостью (таблица 1).

Достижение результатов объемной твердости возможно с получением мартенситной структуры по всей глубине. Мартенситная структура в сталях образуется при высокой скорости охлаждения, при фазовом переходе ниже точки  $A_{C3}$  до окончания превращения, согласно кинетике превращения по диаграммам переохлажденного аустенита. Получение сплошной прокаливаемости возможно при высокой скорости охлаждения как поверхности, так и сердцевины (центра) шаров. Особенно сложно достичь такого превращения при больших диаметрах шаров.

Шар, являющийся фигурой с максимальной массовостью объекта (отношение массы к объему), поэтому зеркало теплоотдачи в среде максимально мало. По закону Фурье теплоотдача начинается от поверхности шара и заканчивается центром шара, поэтому максимальный эффект возможно получить на тех материалах, у которых кинематика превращения происходит с максимальной теплопроводностью внутри объекта.

С другой стороны, сплошная прокаливаемость создает внутренние напряжения (интенсивно остывающая поверхность имеет более плотную

структуру, чем внутренняя часть материала и при дальнейшем охлаждении создается послойное завершение превращения), которые за счет разницы состояния вызывают появление дислокаций и затем могут привести к появлению трещин на шарах, что недопустимо согласно ГОСТ 7524-2015 [63].

Целью решения данного противоречия является подбор марки стали, отвечающей режимам сплошной прокаливаемости и исключающей возникновение внутренних напряжений, а также определение для неё режимов термической обработки для шаров больших диаметров.

После прокатки шары проходят термическую обработку, которая заключается в выравнивании температуры по всему объему шара в индивидуальной ячейке транспортирующего конвейера, дальнейшей закалке в барабанной установке револьверного типа и отпуском в печи.

Выравнивание температуры шаров на поверхности и снижение ее до заданных значений осуществляется на конвейере при транспортировке к задающему лотку барабанной установки. Контроль температуры производят как на входе, так и на выходе с конвейера.

По задающему лотку, с помощью дозирующего устройства, шары распределяются в индивидуальные ячейки барабана, где происходит закалка водой. Вращаясь, барабан обеспечивает вращение и транспортирование шара, исключая образование паровых рубашек. Время нахождения шаров в барабане: для 60 - 80 мм - 4 мин, для 90 - 120 мм - 6 мин. Температура шаров после закалочного барабана не превышает 40 °С.

После закалки шары подаются в накопитель и затем загружаются в отпускную проходную печь с циркуляционной атмосферой прямого нагрева дымовыми газами. Механизм загрузки шаров на транспортер отпускной печи состоит из рамной конструкции, с помощью которой шары распределяются в ряды, равные ширине транспортера. Отпускная печь состоит из пяти зон нагрева и четырех зон выдержки. Температурный режим в каждой зоне представлен в таблице 13.

После отпуска шары попадают во вращающийся барабан и охлаждаются водой, подаваемой на них через форсунки системы охлаждения. После охлаждения, шары, температурой не более 60°C, из ячейки барабана перекачиваются по лотку в разгрузочный лоток, далее по конвейеру готовой продукции на участок складирования и отгрузки.

Таблица 13. Температурный режим по зонам отпускной печи

Диаметр шара, мм	Зона нагрева, °С					Зона выдержки, °С			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60-120	220-	220-	220-	220-	220-	Не более			
	350	350	350	350	350	220	220	220	220

На данном комплексе термообработки были проведены исследования по возможности получения 5 группы твердости [134-137].

Согласно всем представленным патентам на марки стали, используемым для мелющих шаров [138-143], а также технологий термической обработки [144-150], только одна [151] отвечает требованиям для получения шаров 5 группы твердости больших диаметров. Однако, после проведения множества испытаний и изготовления промышленных партий, марки стали, представленные в комплексе с описанной технологией, не смогли показать устойчивость получения шаров 5 группы твердости с отсутствием дальнейшего разрушения.

Возможность получения шаров больших диаметров с гарантированной объемной твердостью исследовалась на четырех сериях изделий из сталей марок Ш-3Р и 75ХГФН [152], при проведении закалки с прокатного нагрева.

Предварительно было проведено детальное изучение процесса подстуживания шаров перед закалкой в программной среде Solid Flow Simulation (рисунок 64) и составлены характеристики оптимального времени выдержки (рисунок 65).

Согласно результатам полученной модели из возможных к изменению параметров были определены два ключевых: время подстуживания перед

закалкой и температура охладителя [153]. Кроме данных параметров, также немаловажным является соблюдение температурно-временных параметров не только закалки, но и отпуска.

В процессе опытной части исследования, часть изделий закалены вне комплекса (вручную) с последующим прохождением отпускной печи, другая часть прошла полностью комплекс термообработки (таблица 14).

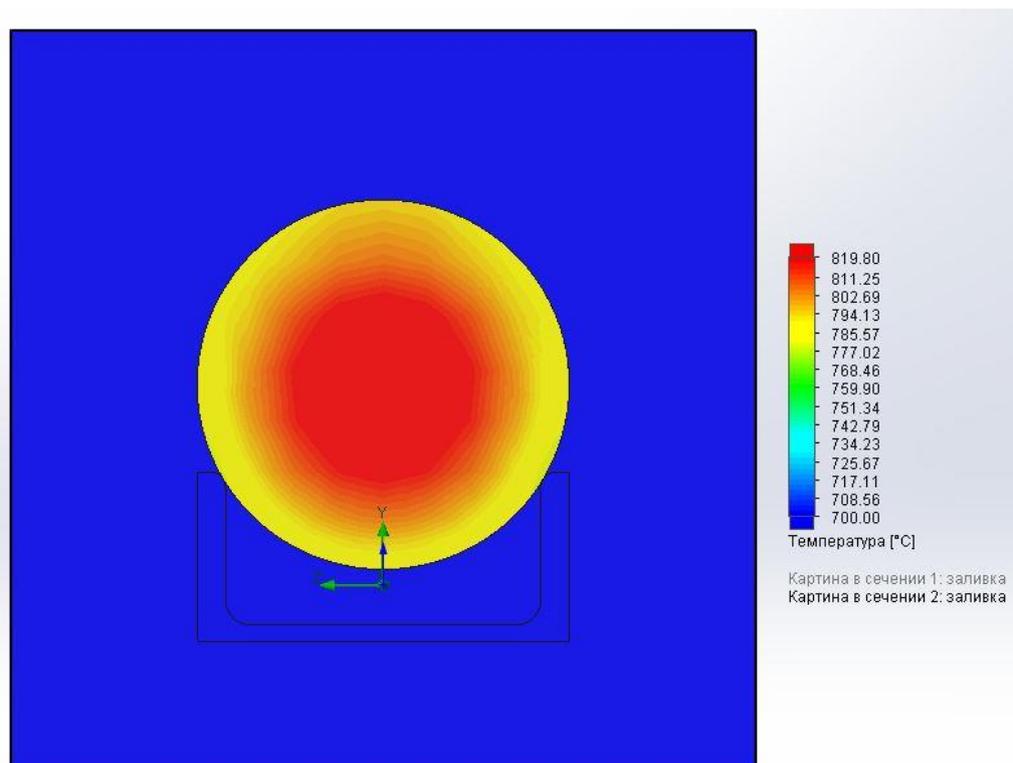


Рисунок 64. Распределение температуры по сечению шара  $\text{Ø}60$  на 150 секунде охлаждения в программной среде Solid Flow Simulation

Таблица 14. Параметры термообработки опытных образцов

Режимы и условия термической обработки	Номер опытного режима, марка стали			
	№1 Ш-3Р	№2 75ХГФН	№3 Ш-3Р	№4 75ХГФН
Условия закалки	Вне комплекса		В закалочном барабане	
Температура шара перед закалкой, °С	840	830	910	920
Температура охладителя (воды), °С	30	30	14	16
Время закалки, мин.	3	3	10	10
Температура отпуска, °С	170	170	160	170
Время отпуска, час.	3	3	3	3

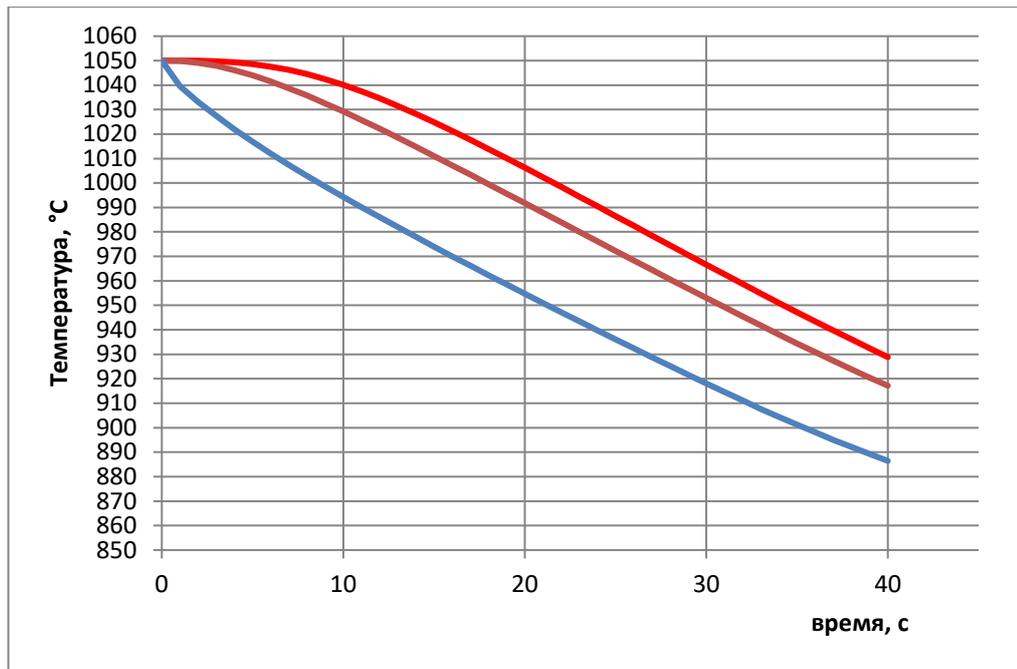


Рисунок 65. Режимы выравнивания температуры для шаров Ø60 в программной среде Solid Flow Simulation.

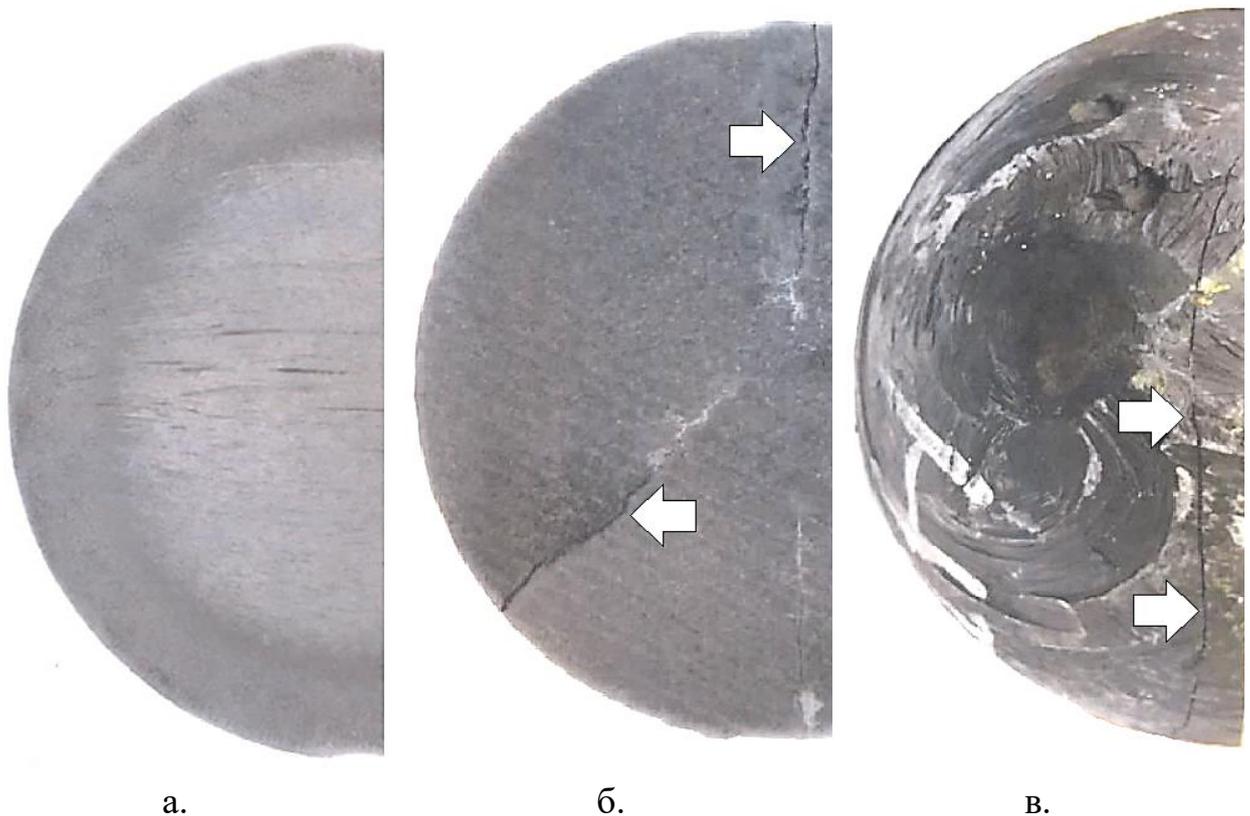


Рисунок 66. Макроструктура (а,б) и вид поверхности (в) шлифовальных шаров, с различной термической обработкой

а.- сталь Ш-3Р, закалка вне комплекса; б, в.- 75ХГФН закалка в барабане. Стрелками обозначены трещины, возникшие в результате термической обработки

Макроструктура выявлялась методом глубокого горячего травления в 50% водном растворе соляной кислоты (рисунки 66.а, 66.б.). Результаты дюрOMETрического анализа для шаров условным диаметром 120 мм с термической обработкой по различным режимам приведены в таблице 14.

После термической обработки по режимам №2 и №4 на поверхности шаров и на макрошлифах выявлены трещины, распространяющиеся вглубь металла на глубину до 45...50 мм. Они имеют извилистые, широко раскрытые края и наиболее выражены на режиме №4 (рисунки 66.б, 66.в.).

Таблица 15. Результаты измерения твердости экспериментальных режимов термической обработки в сравнении с требованиями ГОСТ 7524-2015

№ опытного режима	Твердость, HRC					
	T <sub>пов</sub>	T <sub>0,25</sub>	T <sub>0,5</sub>	T <sub>0,75</sub>	T <sub>ц</sub>	OT
1	54,5	39,25	38	38,75	41	40,85
2	55	51,75	52,25	51,75	53	54,61
3	58	53,25	40	42,25	42,25	51,14
4	55,75	54,25	54,75	55,5	55,0	54,85
Требования ГОСТ 7524-2015	56	-	-	-	-	43

Критерию объемной твердости удовлетворяют все режимы, за исключением №1, что свидетельствует о хорошей прокаливаемости сталей 75ХГФН и Ш-3Р, достаточной для получения мелющих шаров 5 группы при Ø120 мм. Критерию поверхностной твердости полностью удовлетворяет только режим №3 (сталь Ш-3Р), что подчеркивает важность контроля температуры охладителя при закалке.

Использование марки стали 75ХГФН, согласно описанному опыту для шаров меньшего диаметра 60-80, нецелесообразно, т.к. для получения устойчивой 5 группы твердости 100% соблюдение всех технологических параметров не представляется возможным в условиях массового производства. Поэтому в процессе освоения для получения 5 группы шаров меньшего диаметра 60-80, была предложена марка стали 70ХГФН-2 и

разработаны режимы термической обработки, отвечающие заявленным требованиям и полученным условиям на которых получение устойчивого процесса термической обработки уже показали положительный результат [154-157].

Таким образом, возможность массового производства шаров 5 группы твердости обеспечивается точным соблюдением температурно-временных параметров термической обработки и обуславливается высокой автоматизацией комплекса оборудования, контролем и корректировкой всех технологических параметров в on-line режиме. На настоящем этапе оптимальным вариантом является использование стали Ш-3Р, которая является менее требовательной к деликатности процессов термообработки, также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость. Условия реализации технологических режимов термической обработки мелющих шаров на новом шаропрокатном участке АО «ЕВРАЗ-НТМК» позволяет получать высокую твердость шаров на марках стали меньшего целевого назначения, что показывает его существенный потенциал.

#### **4.7. Выводы**

1. Определены условия гарантированного захвата заготовки при условии уменьшения концевой обрезки с использованием гидравлических толкателей в условиях промышленного эксперимента на шаропрокатном стане. Установлено, что повышенное давление в толкателе приводит к увеличению размеров половинки, это увеличивает расход металла. Получены минимально-допустимые значения давления в толкателе от 1,1 до 2,1 МПа в зависимости от диаметра заготовки.

2. Выявлено существенное повышение температуры шара при поперечно-винтовой прокатке от пояска к полюсам с 880°C до 940°C. Обнаруженный прирост температуры (до 60°C) наблюдается в области внедрения реборды вала в заготовку, где происходят значительные

деформации. По точечным температурам поверхности шара на выходе из клетки аналитически определено распределение контактных давлений. Максимальное контактное давление при производстве шара условным диаметром 60 мм составляет 350 МПа и линейно снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации, причем практически сводится к нулю на пояске шара. Визуализация температурных полей в процессе прокатки позволяет оперативно производить настройку стана с обеспечением необходимых геометрических параметров между валками, тем самым снижая локальные напряжения.

3. Установлено, что общая погрешность геометрических размеров производимых шаров складывается из погрешности, обусловленной качеством изготовления инструмента деформации, погрешности настройки стана и погрешности измерений, причем в наибольшей мере допуск на диаметр и овальность заготовки. Предложено по параметру геометрической точности разбить мелющие шары на две категории (обыкновенной и повышенной точности), и в дальнейшем при производстве шаров 4 и 5 групп твердости, для гарантированного исключения их дальнейшего разрушения, использовать шары «повышенной точности».

4. Установлена корреляция эксплуатационных свойств шаров (твердости и глубины прокаливания) и акустических колебаний, вызываемых внешним механическим воздействием. Значения частоты основного тона в момент атаки звука для разных групп шаров имеют достаточно большой диапазон более 150 Гц между поверхностно-закаленными и объемно-закаленными шарами и могут надежно регистрироваться измерительными приборами и являться критерием для классификации изделий по группам твердости. Данный способ может быть рекомендован как экспресс - контроль качества термообработки шаров.

5. В рамках производственного эксперимента получены режимы, гарантирующие получение шаров 5 группы твердости для шаров 60-80 – стали марки 70ХГФН-2. Впервые в условиях закалки с прокатного нагрева

получена 5 группа твердости шаров на больших диаметрах 100-120 мм с использованием сталей марок 75ХГФН и Ш-3Р. Признано более рациональным использование стали Ш-3Р, которая является менее требовательной к деликатности процессов термообработки, также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость. Условия реализации технологических режимов термической обработки мелющих шаров на новом шаропрокатном участке АО «ЕВРАЗ-НТМК» позволяет получать высокую твердость шаров на марках стали меньшего целевого назначения, что показывает его существенный потенциал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований для увеличения ресурса валков предложено изменение скоростного режима работы валков, а для проводок – увеличение рабочей поверхности за счет максимально-допустимой подрезки валков. Разработаны новые калибровки шаропрокатных валков, используя которые возможно получить максимально эффективные режимы прокатки; а также определены наиболее рациональные режимы прокатки и настройки стана.

1. Выявлено, что наиболее подвержены износу две области валков: зона захвата заготовки и зона отделения перемышки, в которых износ достигает предельных значений в первую очередь, установлено, что степень износа как для валков, так и для направляющих проводок интенсивно возрастает по мере самого износа.

2. Установлено, что максимальное влияние на контактное давление частота вращения валков оказывает в момент захвата заготовки. Определено, что для заготовки  $\varnothing 60$  мм допустимая частота вращения валков составит 71 об/мин и, соответственно, для  $\varnothing 80$  мм — 72 об/мин, для  $\varnothing 100$  мм — 65 об/мин, для  $\varnothing 120$  мм — 63 об/мин. Наиболее существенное снижение частоты вращения валков в момент захвата необходимо для заготовок меньшего диаметра, а также при работе валков по мере их износа. Так, для валков с предельно-допустимым износом снижение частоты вращения в момент захвата будет достигать 40% от первоначального значения на новых валках. Использование режимов прокатки с переменной частотой вращения валков по линейной или квадратичной зависимости позволяет уменьшить нагрузку на реборду в месте захвата и увеличить ресурс службы валков.

3. Установлено влияние конструктивных элементов проводок на их износ. Уширение рабочей поверхности возможно при увеличении подрезки одного из валков.

Увеличение ширины рабочей части проводок, при прокатке шаров условным диаметром  $\varnothing 60$  мм,  $\varnothing 80$  мм,  $\varnothing 100$  мм,  $\varnothing 120$  мм, до максимально возможных значений 9,5 мм, 14,5 мм, 16,5 мм и 27 мм, соответственно, повысило их ресурс.

4. Аналитически получены функции значений непрерывно-изменяющегося шага для шаропрокатных валков с постоянной и линейно-увеличивающейся толщиной реборды при выполнении условия сохранения постоянства секундных объемов; определено, что функциональные зависимости непрерывно-изменяющегося шага и параметров развалки калибра, являются характеристическими уравнениями кривых 2-ого порядка. Это позволяет однозначно определить положение образующей кривой (изменения шага и развалки калибра) по 5 точкам. Составлена методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом. При использовании валков с непрерывно-изменяющейся развалкой, нагрузки при прокатке снижаются на 10%, а при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом, на 25-35% в отличие от валков с дискретно-изменяющимися параметрами. Впервые была разработана модель калибровки для валков с переменной глубиной впадины, которая обеспечивает постоянное прилегание заготовки к валкам и создаёт более равномерное распределение контактных давлений по поверхности шара. Для данной модели аналитически были найдены значения изменения шага от изменения радиуса с условием сохранения постоянства объемов.

5. Впервые произведено моделирование прокатки шаров в программе Deform-3D с использованием валков с непрерывно-изменяющимися параметрами. Результаты моделирования с высокой долей аппроксимации сходятся с результатами опытной прокатки шаров как по точности геометрических параметров, включая образующую половинку, так и по энергосиловым параметрам, что доказывает дальнейшую возможность

использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимися параметрами с высокой степенью достоверности результатов моделирования.

6. В результате систематических исследований, решен ряд прикладных задач, направленных на совершенствование технологии производства мелющих шаров.

- за счет обоснования максимально-допустимых значений давления в толкателе, уменьшена концевая обрезь заготовки.

- по точечным температурам поверхности шара на выходе из клетки определено распределение контактных давлений, что позволило рационально настраивать стан, снижая локальные напряжения.

- Проведенные исследования явились научным обоснованием рекомендаций деления мелющих шаров на две категории точности: обыкновенной и повышенной. Причем шары «повышенной точности» целесообразно изготавливать для производства мелющих тел 4 и 5 групп твердости.

- установлена корреляция эксплуатационных свойств шаров (твердости и глубины прокаливания) и акустических колебаний, вызываемых внешним механическим воздействием. Значения частоты основного тона в момент атаки звука для разных групп шаров имеют достаточно большой диапазон более 150 Гц между поверхностно-закаленными и объемно-закаленными шарами и могут надежно регистрироваться измерительными приборами и являться критерием для классификации изделий по группам твердости.

- в рамках производственного эксперимента получены режимы, гарантирующие получение шаров 5 группы твердости для шаров 60-80 – стали марки 70ХГФН-2. Впервые в условиях закалки с прокатного нагрева получена 5 группа твердости шаров на больших диаметрах 100-120 мм с использованием сталей марок 75ХГФН и Ш-3Р. Признано более рациональным использование стали Ш-3Р, которая является менее

требовательной к деликатности процессов термообработки, также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость.

7. Обоснованы и разработаны рациональные режимы настройки шаропрокатного стана, при которых возможно получение продукции с высоким качеством геометрических параметров. Внедрение мероприятий по увеличению ресурса шаропрокатных валков и проводок дали экономический эффект в 2019 году в размере 22,33 и 10,82 млн. рублей соответственно.

**Перспективой дальнейшей разработки темы является:**

- исследование новых материалов для изготовления инструмента деформации шаропрокатных станов с целью увеличения их ресурса;
- развитие теории и методик калибровки шаропрокатных валков с переменными параметрами (например, апробации калибровки с переменной глубиной впадины т.п.);
- нахождение рациональных решений и разработка режимов термической обработки мелющих шаров из перспективных марок стали с целью повышения износостойкости и снижения себестоимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tofil, A. Overview of the research on roll forging process / A. Tofil, Z. Pater // *Advances in Science and Technology Research Journal*. - June 2017. - Volume 11. - Issue 2. - pp. 72-86.
2. Марукович, Е.И. Исследование литья в кокиль цельпечсов Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А/ Лебединский, Ю.В. Саченко, В.А. Харьков, О.Г. Прохоцкий // *Литье и металлургия*. - 2016. - № 1 (82). - С. 27-33.
3. ТУ 1172-004-49547075-2013 Цельпечсы.
4. Способ производства шаров : пат 2167020 Рос. Федерация : МПК<sup>51</sup> 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.
5. Буркин С.П. Высокопроизводительная технология изготовления магниевых заготовок под закрытую штамповку / С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, А.В. Разинкин, В.В. Сапунжи // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*.- 2001. - №1. - С. 11-15.
6. Способ изготовления шаров и устройство для его осуществления Авторское свидетельство SU 609583 А1 : МПК<sup>51</sup> 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.
7. Способ производства шаров Авторское свидетельство SU 586955 А1 : МПК<sup>51</sup> В21Н1/14 / М.И. Ханин, Е.А. Мильман ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени металлургический институт Заявка № 2105571 от 14.02.1975; опубл. 05.01.1978, Бюл.№1. – 2 с.
8. Устройство для поперечно-винтовой прокатки заготовок шаров Авторское свидетельство SU 377187 А1 : МПК<sup>51</sup> В21Н1/14 / А.Я. Буртов,

И.Б. Колтунов ; заявитель и патентообладатель Первый Государственный ордена Ленина подшипниковый завод Заявка № 1355262/25-27 от 07.08.1969; опубл. 17.04.1973, Бюл.№18. – 2 с.

9. Способ прокатки стальных шариков Авторское свидетельство SU 88965 A1 И.Г. Кошарнов. Заявка № 411633 от 04.02.1950; опубл. 10.10.1950, Бюл.№3. – 2 с.

10. Инструмент для изготовления заготовок шариков поперечно-винтовой прокаткой Патент на изобретение RU 2047413 C1 : МПК<sup>51</sup> B21H1/14 / А.Г. Толщихин, С.Г. Митичкин, В.И. Санков ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Гефест» Заявка № 93049858/08 от 11.10.1993; опубл. 10.11.1995. – 4 с.

11. Способ производства коротких тел вращения малого диаметра Авторское свидетельство SU 1423238 A1 : МПК<sup>51</sup> B21H1/14 / Л.Т. Данильченко, П.М. Дудуладов, В.В. Скулкин, Н.А. Кораблев, В.И. Котенок, Н.А. Целиков ; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. А.И. Целикова и Производственное объединение «Красный котельщик» им. 60-летия СССР Заявка № 4007117 от 09.01.1986; опубл. 15.09.1988, Бюл.№34. – 2 с.

12. Walzwerk zur Herstellung kleiner Rotationskörper Патент DE 42849C : МПК<sup>51</sup> B21H1/14 / von Flotow und H.Leidig in Danzig ; опубл. 04.04.1888 г.

13. Machine for forming balls. Патент US 1665361 A : МПК<sup>51</sup> B21H1/14 Y10S29/026 Y10S29/032 Y10T29/49694 / G.O. Hodge ; Заявка от 24.02.1925; опубл. 10.04.1928.

14. Mill for rolling articles of circular section and irregular profile Патент US 2060087 A : МПК<sup>51</sup> B21H1/18 / P. Klamp ; заявитель и патентообладатель Timken roller bearing CO Заявка от 02.06.1934; опубл. 10.11.1936.

15. Continuous transverse rolling process and apparatus Патент JP1372968 : МПК<sup>51</sup> B21H1/18 / Т. Awano,

A. Danno ; заявитель и патентообладатель Toyota chuo kenkyusho КК ; опубл. 01.03.1968 г.

16. Continuous transverse rolling process and apparatus Патент US 3602025 А : МПК51 В21Н1/18 / Т. Awano, A. Danno ; заявитель и патентообладатель Toyota chuo kenkyusho КК ; Заявка от 01.03.1969; опубл. 31.08.1971.

17. Грановский, С.П. Прокатка шаров / С.П. Грановский, А.А. Громов, В.И. Ефанов // Сталь. - 1956. - №4.

18. Целиков А.И. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарич, М.В. Васильчиков и др. – М.: Metallurgy, 1971. – 336 с.

19. Шор Э.Р. Новые процессы прокатки / Э.Р. Шор - Москва: Metallurgizdat, 1960. - 387 с.

20. Мезенин Н.А. Занимательно о железе. / Н.А. Мезенин – М.: Metallurgy, 1977 – 152 с.

21. 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.

22. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. / С.П. Грановский М.: Metallurgy. 1980. - 116 с.

23. Котенок, В.И. Энергоэкономные калибровки валков шаропрокатных станов / В.И. Котенок, С.И. Подобедов // Metallurg. - 2001. - №9. - С.45-47.

24. 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.

25. Устройство к токарно-винторезному станку для нарезания винтовых поверхностей с переменным шагом Авторское свидетельство

837643 МПК<sup>51</sup> 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.

26. Восканьянц, А.А. Моделирование процессов холодной поперечно-винтовой прокатки методом конечных элементов / А.А. Восканьянц, А.В. Иванов // Производство проката. - 2004. - №11. - С. 10-17.

27. Филлипова М.В. Математическое моделирование прокатки шаров / М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, В.Н. Перетягтько, Е.Е. Прудский // Изв. Вуз. Черная металлургия. – 2017. – Т.60. - №7. – С. 516-521.

28. 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.

29. Yang, H. The Analysis of the Stress and Strain in Skew Rolling / Haibo Yang, Lijie Zhang and Zhenghaun Hu // Advanced Materials Research. – 2012. – 1650-1653 pp.

30. Hu Z.H. Skew Rolling and Cross-Wedge Rolling-Principles, Processes and Machines / Z.H. Hu, X.H. Xu, D.Y. Sha / Metal. Ind. Press, Beijing, China. – 1985.

31. Zhang. Q.-S, A Study of Helical-Groove Rolling in China / Q.-S Zhang. // J. Mater. Process Technol. 21. – 1990. - 251-261 pp.

32. Yang, S.-C. The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. / S.-C. Yang, C.-K. Chen // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 215. – 2001. - 523-532 pp.

33. Yang, H. Modeling and Assessment of the Stress and Strain in the Skew Rolling Process by FEM / Haibo Yang // in Proceedings of the 7th CAE of Metal Plastic forming, Wuhan, Chian. – 2002. - pp. 90-98.

34. Xiao-min, S. Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling / Shi Xiao-min, Wang Bao-yu // *Materials Science Forum*. – 2012. – 151-154 pp.
35. Кожевникова, Г.В. Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток / Г.В. Кожевникова // *Вестник Белорусско-Российского университета*. — 2009. — № 1 (22). — С. 44–53.
36. Lutz, H. "Mannesmann, Reinhard" / Hatzfeld Lutz - in: *Neue Deutsche Biographie* 16. - 1990, - 62 pp.
37. Shu, C. Influencing Factors of Void closure in Skew-Rolled Steel Balls Based on the Floating-Pressure Method / Chang Shu, Jitai Wang, Xuedao Shu, Duanyang Tian // *Materials*. – april 2019. - №12. – 1391.– pp. 1-15.
38. Pater, Z. Analisis of helical rolling process of balls formed a head of a scrapped rail / Zbigniew Pater // *Advances in Science and Technology Research Journal* - June 2016. - Volume 10. – №30. – pp. 110-114.
39. Pater, Z. FEM modeling of a helical wedge rolling process for axisymmetric parts / Zbigniew Pater, Janusz Tomczak // *Advances in Science and Technology Research Journal*. - March 2018. - Volume 12. - Issue 1. – pp. 115-126.
40. Pater, Z. A helical wedge rolling process for producing a ball pin / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk // *Procedia Manufacturing* 27, - 2019. – pp. 27-32.
41. Pater, Z. Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a workholding bolt / Zbigniew Pater // *METABK* 53(4), - 2014. – pp. 653-656.
42. Pater, Z. FEM Analysis of the Multi-Wedge Helical Rolling Process for a Workholding Bolt / Zbigniew Pater // *MATEC Web of Conferences* 80, - 2016. - pp. 1-6.
43. Pater, Z. New method of thread rolling / Z. Pater, A. Gontarz, W. Weronki // *Journal of Materials Processing Technology* 153–154, - 2004. – pp. 722–728.

44. Tomczak, J. Skrew rolling of balls in multiple helical impression / J. Tomczak, Z. Pater, J. Bartnicki // Archives of metallurgy and materials Volume 58, - Issue 4. – 2013. - 1071-1076.
45. Pater, Z. A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls / Z. Pater // METABK 55(2), - 2016. – pp. 233-236.
46. Chyla P. Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls / P. Chyla, Z. Pater, J. Tomczak, P. Chyla // Arch. Metall. Mater., - 2016. - Vol. 61, - No 2, – pp. 485-492.
47. Tomczak, J. The Effect of Process Parameters in Helical Rolling of Balls on the Quality of Products and the Forming Process / Janusz Tomczak, Zbigniew Pater, Tomasz Bulzak // Materials. - October 2018. - pp. 1-15.
48. Pater, Z. Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls / Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Jaroslaw Bartnicki, Tomasz // Metals, - October 2018. – pp. 1-14.
49. Sokhan D. Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko // Mechanics and Advanced Technologies, – 2018. - Vol 83, - No 2. – pp. 24-30.
50. 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.
51. Перетяцько В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1. / В.П. Перетяцько, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2013. - № 4. - С.27-30
52. Перетяцько В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2. / В.П. Перетяцько, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2013. - № 6. - С.16-20
53. Перетяцько В.Н. Калибровка валков для прокатки шара / В.П. Перетяцько, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Вестник горно-

металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. - 2012. - № 30. - С. 44-50.

54. Филипова М.В. Усилия при прокатке шаров / Филиппова М.В., Перетяtko В.Н., Климов А.С. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. - 2011. - № 27. - С. 143-146.

55. Филипова М.В. Усилия и напряжения при прокатке шара / М.В. Филипова, В.Н. Перетяtko., С.В. Сметанин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2016. - Т.59. - №8. - С. 587-588.

56. 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.

57. Рубцов В.Ю. Влияние размеров бочки шаропркатного валка на качество шара / В.Ю. Рубцов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 90-93.

58. Рубцов В.Ю. Калибровка валков поперечно-винтовой прокатки периодических профилей, образованных кривыми второго порядка / В.Ю. Рубцов // Калибровочное бюро. – 2018. - №12. – С. 26-33.

59. Рубцов В. Ю. Методика расчета усилий при поперечно-винтовой прокатке периодических профилей полуэллипсоидной формы на примере цельпесков / В. Ю. Рубцов // Калибровочное бюро. – 2017. - №10. – С. 14-20.

60. Способ изготовления заготовок корпусов для бетонобойных и бронебойных снарядов : пат 2659442 Рос. Федерация : МПК<sup>51</sup> F42В 12/04; С21D 9/16; С21D 8/10; В21Н 3/00 / В.Ю. Рубцов ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество Нижнетагильский металлургический комбинат (АО ЕВРАЗ НТМК) - № 2017139250 ; заявл. 09.11.2017 ; опубл. 2.07.2018, Бюл. №19. – 11с.

61. Рубцов В.Ю. Производство корпусов снарядов методом поперечно-винтовой прокатки на шаропркатных станах / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Известия РАН. – 2019. - №1 (106). – С. 97-103.

62. Котенок В.И. Деталепрокатка – современная технология производства заготовок и изделий из стали и цветных металлов / В.И. Котенок, Н.В. Пасечник // Заготовительное производство в машиностроении. - 2004. - №3. - С.39-45.
63. ГОСТ 7524-2015 Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. – М. : Стандартиформ, 2016. – 8 с.
64. 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.
65. Сталинский Д. В. Выбор материала и технологии термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа / Д.В. Сталинский , А. С. Рудюк , В. К. Солёный // Сталь. - 2017. - № 7. - С. 64 – 69.
66. Сахраю А. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров / А. Сахраю [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. - №5. – С. 34-38.
67. 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.
68. 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.
69. Уманский А.А. Исследование влияния параметров закалочной микроструктуры мелющих шаров, произведенных методом поперечно-винтовой прокатки, на их эксплуатационные характеристики / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.В. Щукин, А.С. Симачев // Производство проката. - 2019. - № 3. - С. 34-39.
70. Щукин А. Г. Исследование влияния параметров микроструктуры помольных шаров на их эксплуатационные характеристики / А.Г. Щукин,

Е.М. Сулова // Наука и молодёжь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Новокузнецк, 14-16 мая 2019. – С. 134-138.

71. Найзабеков А.Б. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства А.Б. Найзабеков, Б.С. Мухаметкалиев, А.С. Арбуз, С.Н. Лежнев. // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2016. - № 4 (46). - С. 78-86.

72. Кузьмин В.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали / В.О. Кузьмин // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. - 2011. - № 2 (23). - С. 117-126.

73. Чиж Е.В. Выбор и анализ технологии изготовления мелющих тел / Е.В. Чиж, М.Б. Абенова // Теория и технология металлургического производства. 2016. - № 2. - С. 26-33.

74. Вдовин К.Н. Качество мелющих шаров, изготовленных различными методами / К.Н. Вдовин, Н.А. Фоктистов, М.Б. Абенов, В.Д. Куликов., И.С. Кондратьев // Теория и технология металлургического производства. - 2015. - № 1 (16). - С. 78-81.

75. 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.

76. Ефременко В.Г. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра / В.Г. Ефременко [и др.] // Металлург. – 2013. - №9. – 88-92.

77. 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.

78. ГОСТ 30479-97 «Обеспечение износостойкости деталей». – М : ИПК Издательство стандартов, 1998 – 12 с.

79. Способ ремонта прокатных валков Авторское свидетельство SU 1722762 A1 : МПК<sup>51</sup> В23 Р 6/00. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.К. Автухов, Н.Д. Бойко, Л.Д. Воловик, заявитель и патентообладатель Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства - Заявка № 4780841 от 09.01.1990; опубл. 30.03.1992. Бюл.№12. – 8 с.

80. 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: материалы 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.

81. Rubcov V.Yu Research into in-service deterioration of ball-rolling rolls / V.Yu. Rubcov, O.I. Shevchenko, A.S. Spirina, N.A. Pankova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol 966 – 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy. – 2020. – №1. – pp. 012069.

82. ГОСТ 4543-2016 Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. – М : Стандартинформ, 2017. – 50 с.

83. ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры – М : ИПК Издательство стандартов, 1985. - 28 с.

84. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна – М : ИПК Издательство стандартов, 2003. - 28 с.

85. Рубцов В.Ю. Характер интенсивности износа шаропрокатных валков и критерии отбраковки / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Труды XII Конгресса прокатчиков (том I). Сборник статей под редакцией Спирина С.А., Думчевой Т.Н. – Москва: Грин Принт. – 2019. Т.1. – С. 187-191.

86. Тетерин, П. К. Теория поперечной и винтовой прокатки [Текст] / П. К. Тетерин. — М.: Metallurgy, 1983. — 270 с.
87. 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.
88. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков - М: Metallurgy. 1962 - 496 с.
89. Rubtsov V.Yu Improving dynamic regime of rolling for increasing durability of ball-rolling mill rolls / V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova // Izvestiya Ferrous Metallurgy – 2018. – Т.61. - №12. – С. 927-932.
90. Rubtsov V.Yu Improvement of Rolling Dynamics to Increase Roller Life in Ball Rolling / V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova // Steel in Translation. – 2018. – Т. 48. – №12. – pp. 757-761.
91. Способ регулирования частоты вращения валков шаропркатных станов : пат 2723342 Рос. Федерация : МПК51 В21Н 1/14 / В.Ю. Рубцов, А.А. Серебренников, О.И. Шевченко, Д.А. Замураев ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество Нижнетагильский металлургический комбинат (АО ЕВРАЗ НТМК) - № 2019117608 ; заявл.06.06.2019 ; опубл. 09.06.2020, Бюл. №16. – 10с.
92. Рубцов В.Ю. Возможность использования ассиметричных валков шаропркатных 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.

93. 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.

95. 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.

96. Рубцов В.Ю. Изготовление шаропрокатных валков с переменной глубиной впадины / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2019. - №14. – С. 16-24.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. 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.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

105. 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.

Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2020.  
- Т.1. – С. 178-179.

106. 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.

107. 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.

108. Стан ЦКБММ 44 для прокатки шаров 40-80 Технический проект / М.: ЦНИИТМАШ, 1955. – 54 с.

109. Стан ЦКБММ 45 для прокатки шаров 80-125 Технический проект / М.: ЦНИИТМАШ, 1955. – 58 с.

110. ТИ. 102-П-300-2019. Производство мелющих шаров на участке ШПС РБЦ. АО «ЕВРАЗ-НТМК» Технологическая инструкция. / Нижний Тагил. – 2019. – 51 с.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

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.

114. 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.

115. 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.

116. 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.

117. Рубцов В.Ю. Распределение температурных полей и удельных обжятий 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.

118. РД 50-98-86 «Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051-81)». – М : Издательство стандартов, 1987. – 84 с.

119. ГОСТ 8.051-81 ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – М : Издательство стандартов, 1987. – 10 с.

120. ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия. – М : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 11 с.

121. 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.

122. Способ прокатки шаров Авторское свидетельство SU 245002 A1: МПК51 В21Н / С.П. Грановский, В.И. Ефанов, С.А. Яковлев, ; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проклетно-конструкторский институт металлургического машиностроения - Заявка № 882658/22-2 от 24.02.1964. опубл. 04.06.1969. Бюл.№19. – 1 с.

123. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. М : Стандартиформ, 2010. – 8 с.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

128. 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. –

Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018.  
– С.61-62.

129. 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.

130. 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.

131. 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.

132. 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 PAO DMPZ / M.M. Lam , A.I. Serov , E.N. Smirnov et al. // Steel in Translation. - 2017. -Vol. 47. - № 5. - P. 325-329.

134. 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.

135. Галимьянов И.К. Влияние температуры в круглой заготовке на структуру и раскол мелющих шаров / И.К. Галимьянов // В книге: MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019 Материалы IV

международной молодежной научно-практической конференции. Под редакцией А.Г. Корчунова. 2019. - С. 46-52.

136. Галимьянов И.К. Влияние температуры и структуры круглой заготовки на раскол мелющих шаров / И.К. Галимьянов // Черные металлы. – 2019. - №10. – с. 63-66.

137. Шведов К.Н. Получение мелющих шаров с высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью / К.Н. Шведов, И.К. Галимьянов, М.А. Казаковцев // Metallurg. – 2020. - №6. – С. 15-21.

138. Сталь. Патент на изобретение RU 2415194 С1 : МПК51 С22С 38/38 С22С 38/34 С22С 38/32 / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, О.П. Атконова, Н.А. Козырев, Л.В. Корнева, ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Новокузнецкий металлургический комбинат» - Заявка № 2009125070/02 от 30.06.2009. опубл. 27.03.2011. Бюл.№9. – 5 с.

139. Сталь. Патент на изобретение RU 2425168 С2 : МПК51 С22С 38/26 / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, О.П. Атконова, Л.В. Корнева, Н.А. Козырев, Т.В. Прокопьева ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Новокузнецкий металлургический комбинат» - Заявка № 2009136798/02 от 05.10.2009 опубл. 27.07.2011. Бюл.№21. – 5 с.

140. Сталь. Патент на изобретение RU 2425169 С2 : МПК51 С22С 38/26 / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, Н.А. Козырев, Л.В. Корнева, О.П. Атконова ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Новокузнецкий металлургический комбинат» - Заявка № 2009136799/02 от 05.10.2009. опубл. 27.07.2011. Бюл.№21. – 6 с.

141. Сталь. Патент на изобретение RU 2082812 С1 : МПК51 С22С 38/14 / В.Я. Тишков, А.Д. Пешев, В.С. Гладков, Н.Н. Крапивин, А.Л. Мясников, Ю.В. Гавриленко, С.И. Сеницын, А.Н. Боровков ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество открытого типа «Северсталь» - Заявка № 95105859/02 от 14.04.1995. опубл. 27.06.1997. – 5 с.

142. Сталь. Авторское свидетельство SU 1446189 А1 : МПК51 С22С 38/16 / Я.Н. Малиночка, Г.З. Ковальчук, В.Н. Ярмаш, Л.Г. Поздняков, С.Н.

Поляков, В.К. Бабич, В.Т. Лобачев, А.Н. Несмачный, Н.И. Глоба, О.А. Зеленый, Б.А. Дворядкин, В.Г. Петренко, Н.М. Хорошилов, В.Н. Голобородов, М.М. Верклов - Заявка № 4263270 от 15.06.1987. опубл. 23.12.1988. Бюл.№47. – 2 с.

143. Сталь. Авторское свидетельство SU 1497262 A1 : МПК51 C22C 38/14 / Л.Г. Поздняков, С.Н. Поляков, В.К. Бабич, Н.М. Хорошилов, А.Н. Несмачный, Н.И. Глоба, Ю.Ю. Проценко - Заявка № 4365049 от 13.01.1988. опубл. 30.07.1989. – 2 с.

144. Способ производства стальных мелющих шаров Патент на изобретение RU 2596737 C1 : МПК51 C21D 9/36 B21H 1/14 C21D 1/02 B23P 15/00 / Г.А. Котов, Е.Н. Росляков, Л.Н. Ронжина ; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Северсталь» - Заявка № 2015117957/02 от 13.05.2015. опубл. 10.09.2016. Бюл.№25. – 8 с.

145. Устройство и способ термической обработки шаров Патент на изобретение RU 2455369 C1 : МПК51 C21D 9/36 / Черкайкин В.Н., Саттаров Р.Г., Вяткин А.Л., Алеев Р.Н. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «ПРОМКО» - Заявка № 2011118107/02 от 06.05.2011. опубл. 10.07.2012. Бюл.№19. – 8 с.

146. Способ термической обработки мелющих шаров. Патент на изобретение RU 2113513 C1 : МПК51 C21D 9/36 / Зеликович А.Я., Киричков А.А., Щербаков Ю.А., Лебедев С.И., Петренко Ю.П. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Нижнетагильский металлургический комбинат» - Заявка № 96103830/02 от 27.02.1996. опубл. 20.06.1998. – 3 с.

147. Устройство для закалки шаров. Патент на полезную модель RU 11204 U1 : МПК51 C21D 1/02 / Кузовков А.Я., Полушин А.А., Петренко Ю.П., Егоров В.Д., Данишевский А.Г., Степанов В.А., Мюнх В.Ф., Касаткин В.В. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» - Заявка № 98116101/20 от 25.08.1998. опубл. 16.09.1999. – 10 с.

148. Способ термической обработки мелющих шаров. Авторское свидетельство SU 1222688 A1 : МПК51 C21D 9/36 / Сиухин А.Ф., Гринь В.А., Ключник Ю.А., Зеликович А.Я., Клименко А.Н., Сичевой А.П., Брежнев Л.А., Заннес А.Н., Кабанов А.В., Токмаков А.М. ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени металлургический институт, Украинский государственный институт по проектированию металлургических заводов и Украинский научно-исследовательский институт металлов. - Заявка № 3512708 от 18.11.1982. опубл. 07.04.1986. Бюл.№13. – 3 с.

149. Способ термической обработки мелющих шаров. Авторское свидетельство SU 1344793 A1 : МПК51 C21D 9/36 / Ткаченко Ф.К., Плевик А., Ефременко В.Г., Заннес А.Н. ; заявитель и патентообладатель Ждановский металлургический институт - Заявка № 4035537 от 07.03.1986. опубл. 15.10.1987. Бюл.№38. – 4 с.

150. Способ обработки мелющих шаров. Авторское свидетельство SU 1693095 A1 : МПК51 C21D 9/36 / Гринь В.А., Лещенко А.Н., Сиухин А.Ф., Соленый В.К., Плукчи В.С., Клименко А.П., Заннес А.Н., Егоров В.Д., Коротков А.И., Щербаков Ю.А., Третьяков М.А. ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский металлургический институт - Заявка № 4723758 от 26.07.1989. опубл. 23.11.1991. Бюл.№43. – 2 с.

151. Способ и устройство термической обработки шаров. Патент на изобретение RU 2634541 C : МПК51 C21D 9/36 / Хлыст С.В., Иванов А.Г., Кириченко М.Н., Пшеничников П.А., Шестаков А.Н., Кузьмиченко В.М., Хлыст И.С., Челядинов В.В., Кузнецов И.Н. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания» - Заявка № 2016137380 от 31.08.2016. опубл. 31.10.2017. Бюл.№31. – 16 с.

152. ГОСТ 1071-81 Проволока стальная пружинная. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 10 с.

153. Шевченко О.И. Экспериментальные режимы термической обработки мелющих шаров с получением гарантированной объемной твердости / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, В.Ю. Рубцов, В.В. Курочкин // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов = Actual Problems of the Physical Metallurgy of Steels and Alloys: сборник тезисов докладов XXV Уральской школы металловедов-термистов (Екатеринбург, 3–7 февраля 2020 г.); Мин-во науки и высш. образования РФ. - Екатеринбург : Изд-во Урал.ун-та, 2020. – С. 20-22.

154. Рубцов В.Ю. Освоение производства мелющих шаров пятой группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2018. - №13. – С. 20-22.

155. Шевченко О.И. Апробация термической обработки мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, В.Ю. Рубцов, В.В. Курочкин // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении ИТММ-2019 : Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летнему юбилею кафедры «Металловедение, технология термической и лазерной обработки металлов». – Пермь. – 2019. – С. 294-297.

156. 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.

157. 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом

При проектировании шаропрокатных валков, среди характеристик стана, таких, как мощность прокатного двигателя и жесткость клетки (для проверки энергосиловых характеристик возможности прокатки того или иного диаметра шара), а также максимально-возможных углов наклона  $\beta$  и углов горизонтального разведения валков  $\alpha$  (для возможности использования нескольких заходов), основными параметрами для любого шаропрокатного валка будут (рисунок П.1.):

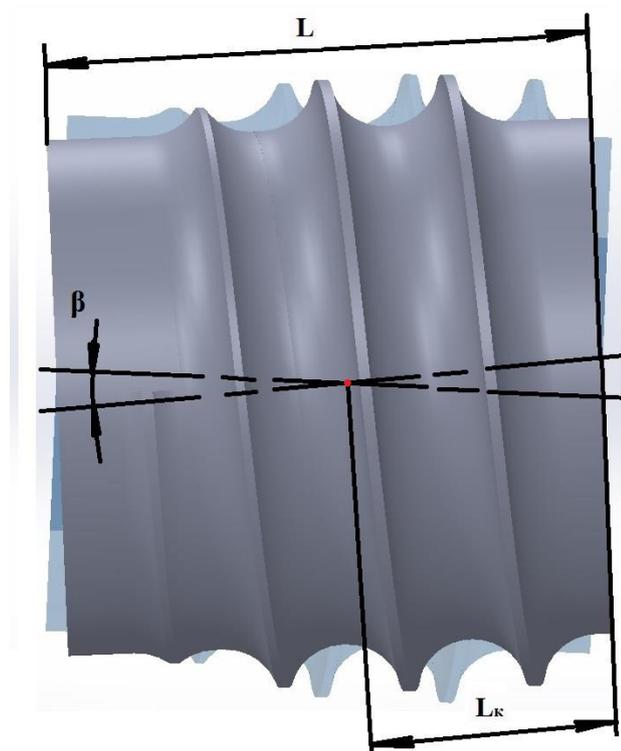


Рисунок П.1. Определение точки скрещивания валков

- диаметр бочки валка,  $D$ ;
- длина бочки шаропрокатного валка,  $L$ ;

- определение точки скрещивания валков (определяется характеристикой стана, совпадает с осью поворота кассеты) – другими словами, расстояние от торца валка до её расположения -  $L_k$ ;

- диаметр получаемого шара,  $d_{ш}$ ;

- направление вращения валков в стане.

Порядок расчета калибровки и построения модели шаропрокатного валка будет заключаться в следующем:

1. Определяется диаметр впадины  $d_в$  шаропрокатного валка

$$d_в = d_{ш} k_m,$$

где  $k_m$  – коэффициент температурного расширения, для горячего шара обычно принимается  $k_m=1,02$ .

При проектировании шаропрокатного валка, описанного в 3 главе данной диссертации, для прокатки шара условным диаметром 120 мм, у которого номинальный диаметр в холодном состоянии, согласно ГОСТ 7524 составляет 125 мм, было получено значение  $d_в = 125 \cdot 1,02 = 127,5$  мм.

2. Выбирается толщина реборды.

В устоявшемся процессе прокатки, реборда между соседними витками ограничена находящимся в них металлом, поэтому чаще всего реборда испытывает только нормальные напряжения и работает торцевой частью. Однако при возможности переполнения калибра (например, при неправильной настройке стана), избыток металла в одном витке будет создавать тангенциальное напряжение на реборду, что может вызвать её разрушение (см. рисунок 12 п.п. 2.1), поэтому расчет толщины реборды определяем из условия прочности. Основываясь на расчетах «Сопrotивления материалов» и значениях допустимых нагрузок при прокатке шара условным диаметром 120 мм - для материала валка из стали 5ХНМ минимальная толщина реборды, исключая её разрушение, составит 11 мм. В качестве примера, т.к. дальнейший расчет калибровки будет производиться из условия постоянной толщины реборды, принимаем толщину реборды по всей длине валка  $S_n=11$  мм.

3. Определяется шаг калибрующей части:

$$T_k = d_в + S_n.$$

Соответственно подставив известные значения, получаем –

$$T_k = 127,5 + 11 = 138,5 \text{ мм}$$

4. Определение количества витков в калибрующей части.

$$\varphi_k = 360^\circ \cdot L_k / T_k.$$

Согласно примеру  $\varphi_k = 360^\circ \cdot 250 / 138,5 = 649,8^\circ$  (1,8 оборота валка)

5. Производим построение калибрующей части валка (на примере Solid Works 2018).

Моделируется гладкая бочка валка в виде цилиндра с размерами  $D \times L$ , что в приведенном примере составляет  $\varnothing 700 \times 600$

Затем на окружности торца бочки вписывается диаметр впадины (в нашем случае 127,5 мм), а также из данной точки строится спираль, равная диаметру бочки валка с постоянным шагом  $T_k$  и числом оборотов  $\varphi_k$  (рисунок П.2).

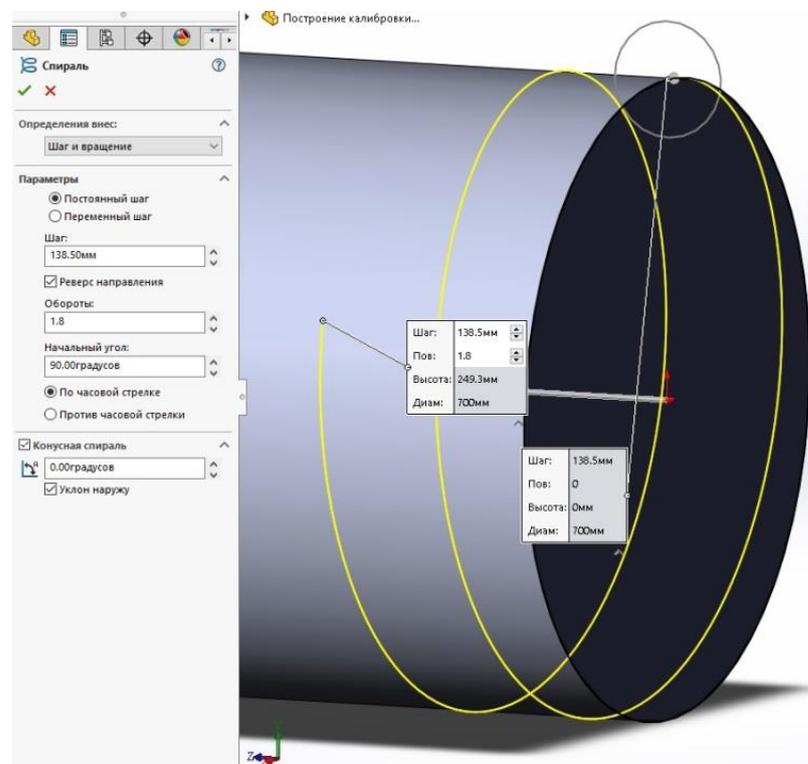


Рисунок П.2. Построение винтовой линии канавки калибрующей части

6. Определяется длина формирующей части вала:

$$L_{\phi} = L - L_k.$$

В примере  $L_{\phi} = 600 - 250 = 350$  мм

7. Определение количества витков в формирующей части:

$$\varphi_k = 360^{\circ} \cdot L_{\phi} / T_k.$$

Для определения количества витков в формирующей части вала используется шаг калибрующей части вала. В формирующей части значения шага будут уменьшаться по ходу приближения к зоне захвата, однако, исходя из опыта, со стороны захвата для обеспечения центровки и нормальной задачи заготовки необходимо наличие цилиндрической части на валке. Цилиндрическая часть будет обеспечена за счет того, что фактический размер рабочей формирующей части из-за непрерывного уменьшения шага будет меньше расчетной формирующей части вала.

Согласно примеру  $\varphi_k = 360^{\circ} \cdot 350 / 138,5 = 909,7^{\circ}$  (2,52 оборота вала)

Для упрощения дальнейшего расчета, округляем число витков формирующей части до 2,5 оборотов ( $900^{\circ}$ ), чего будет вполне достаточно для нормального формирования шара из заготовки.

8. Определяются значения подрезки реборды:

Максимальное значение высоты реборды  $H_{max}$  будет равно глубине впадины, соответственно, радиусу шара  $R$  – данное значение будет находиться в точке скрещивания, что определяется углом калибрующей части  $\varphi_{k0} = 0^{\circ}$

Соответственно, минимальное значение будет определяться точкой начала реборды  $H_{min}$  (в точке захвата заготовки) и определяться  $\varphi_{kf} = 900^{\circ}$

Значение начальной высоты реборды должно характеризоваться гарантированным захватом заготовки. Глубина впадины равна её диаметру  $d_v$ , а диаметр заготовки  $d_z$ , как правило, на 4% меньше диаметра шара. Поэтому начальная высота реборды задается согласно этой разнице, чтобы реборда сразу при задаче заготовки в стан имела с ней контакт. Иначе, при отсутствии её касания с самого начала, будет происходить смещение начальной точки

контакта, что сместит начальный шаг и изменит объем захватываемого металла, это в дальнейшем приведет к переполнению калибра.

Согласно приведенному примеру  $H_{min}=125 \cdot 4\% / 100\% = 5$  мм.

Далее, исходя из того, что график изменения высоты реборды будет иметь линейный характер (описано в п.п.3.1), для его построения достаточно двух точек.

$H_{max}=125/2=62,5$  мм, при  $\varphi_{к0}=0^\circ$

$H_{min}=5$  мм, при  $\varphi_{кf}=900^\circ$

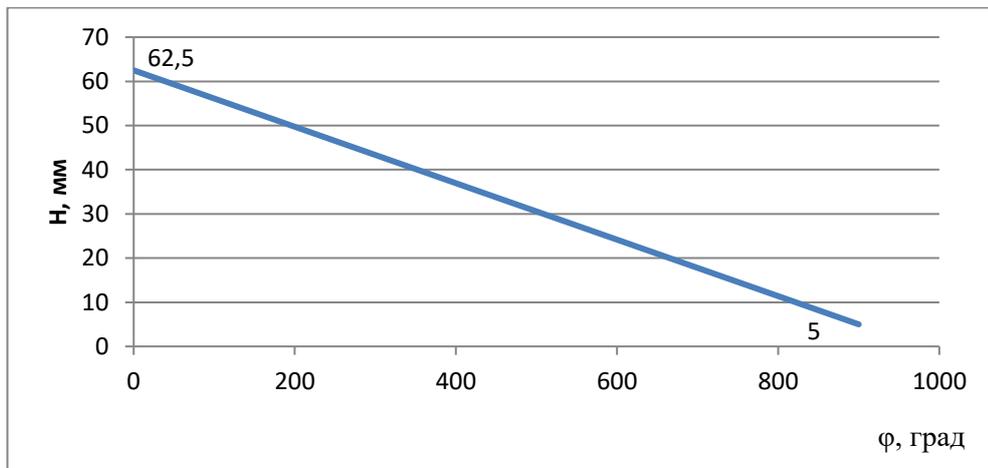


Рисунок П.3. График подрезки реборды

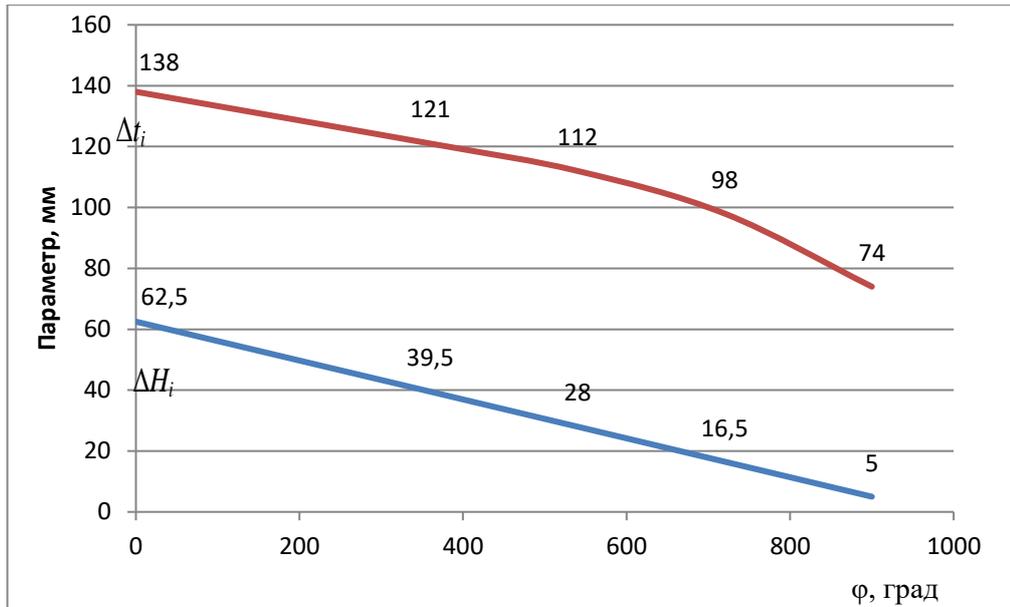
9. Производится определение координат непрерывно-изменяющегося шага.

Исходя из вышеописанного правила применения кривых 2-ого порядка, на графике подрезки реборды выбираем 5 точек (две точки начальная и конечная уже определены), остальные точки выбираем для дальнейшей простоты построения через  $180^\circ$  (пол-оборота). Так как  $\varphi_{кf}=900^\circ$ , а наиболее интенсивно шаг будет изменяться ближе к зоне захвата, то допускается нахождение первой точки на  $\varphi_{к1}=360^\circ$  от точки скрещивания.

Исходя из вышесказанного, получается 5 точек, соответствующих следующим углам:  $\varphi_{к0}=0^\circ$ ,  $\varphi_{к1}=360^\circ$ ,  $\varphi_{к2}=540^\circ$ ,  $\varphi_{к3}=720^\circ$ ,  $\varphi_{кf}=900^\circ$

Для данных углов значения высоты реборды  $\Delta H_i$  определяются по графику (рисунок П.4), либо с применением аналитической формулы:

$$H_i = (H_{max} - H_{min}) \cdot (\varphi_{кf} - \varphi_{ки}) / \varphi_{кf} + H_{min}$$

Рисунок П.4. Значения  $\Delta H_i$  и  $\Delta t_i$  по 5 точкам

Затем, подставляя в выведенную в диссертации формулу (23) в качестве переменного значения  $x = r_{an+1}$ , которое является ничем иным как  $x = R - H_i$ , находим значения шага в этих точках (кривая непрерывно-изменяющегося шага  $\Delta t_i$  по данным точкам на рисунке П.4).

10. Следующим этапом по данным 5 значениям шага, строим спираль с непрерывно-изменяющимся шагом в формирующей части вала (рисунок П.5)

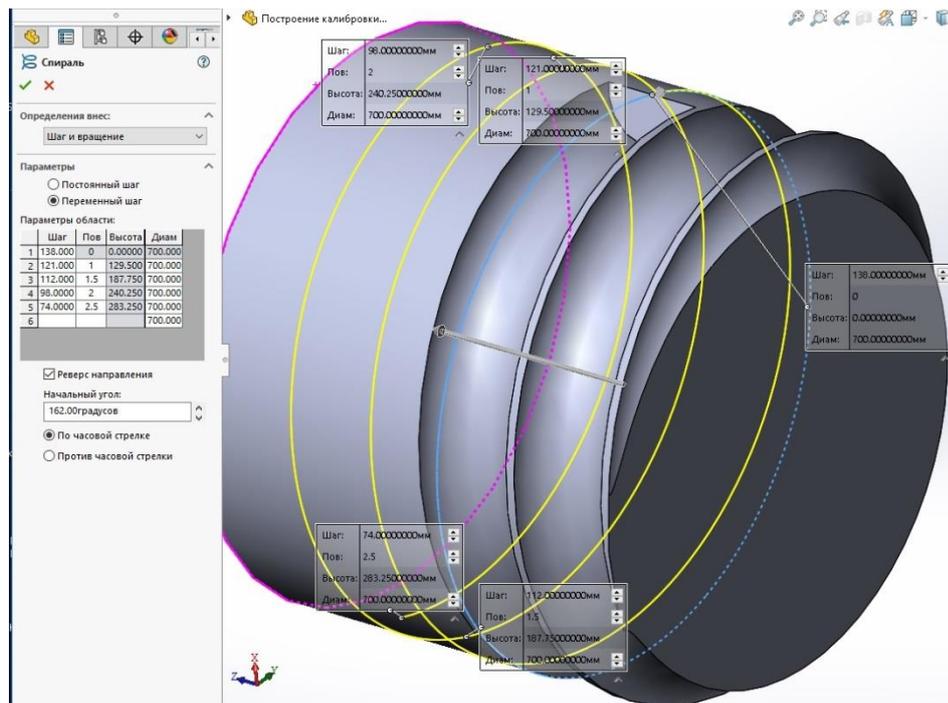


Рисунок П.5. Построение винтовой линии канавки формирующей части

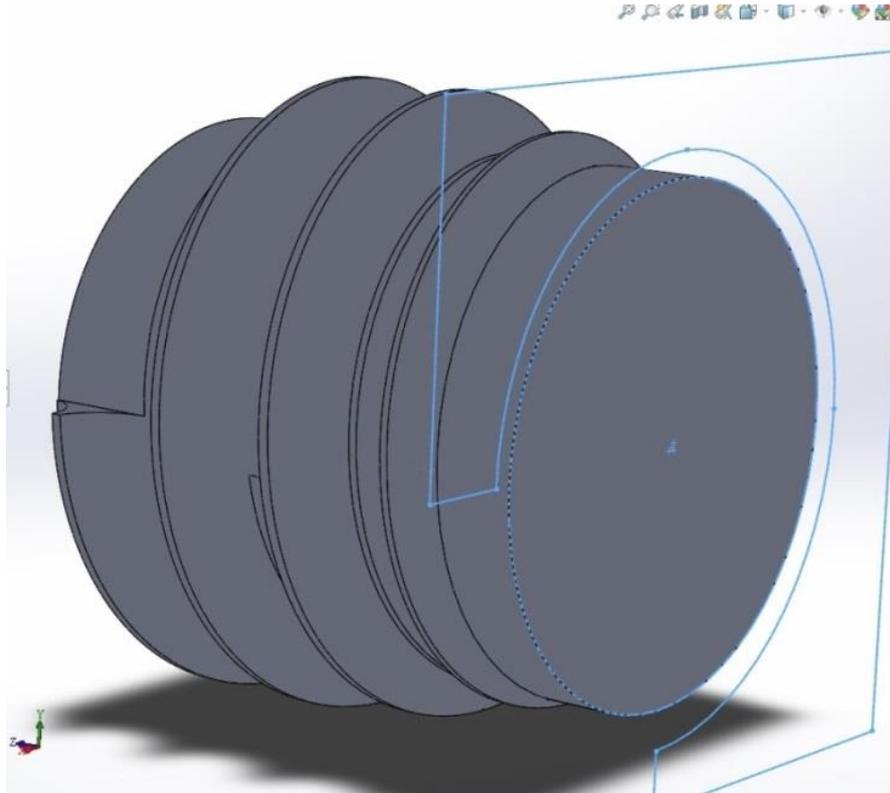


Рисунок П.6. Подрезка реборды валка

11. Исходя из значений вытяжки, определяется развалка калибра (21) и аналогично производится построение спирали и «вырезом по кривой» производится развалка калибра.

12. После этого требуется произвести подрезку реборды, для этого, согласно графику рисунка П.3. (исходя из линейного уменьшения), реборда подрезается по высоте с торца валка (Рисунок П.6).

13. Также реборда подрезается по наружному диаметру на всю длину бочки валка (причем с разным значением для отрезного и формирующего валка – в этом состоит их принципиальное отличие).

В данном примере, основываясь на результатах п.п.2.3, наружные диаметры валков по максимальной высоте реборд составили 692 и 678,5 – для отрезного и формирующего валка соответственно.

14. Затем на 3-D модели валка производятся все дополнительные операции (по необходимости – подрезается выходная часть реборды, создается отверстие, шпоночные пазы, фаски и т.д.).

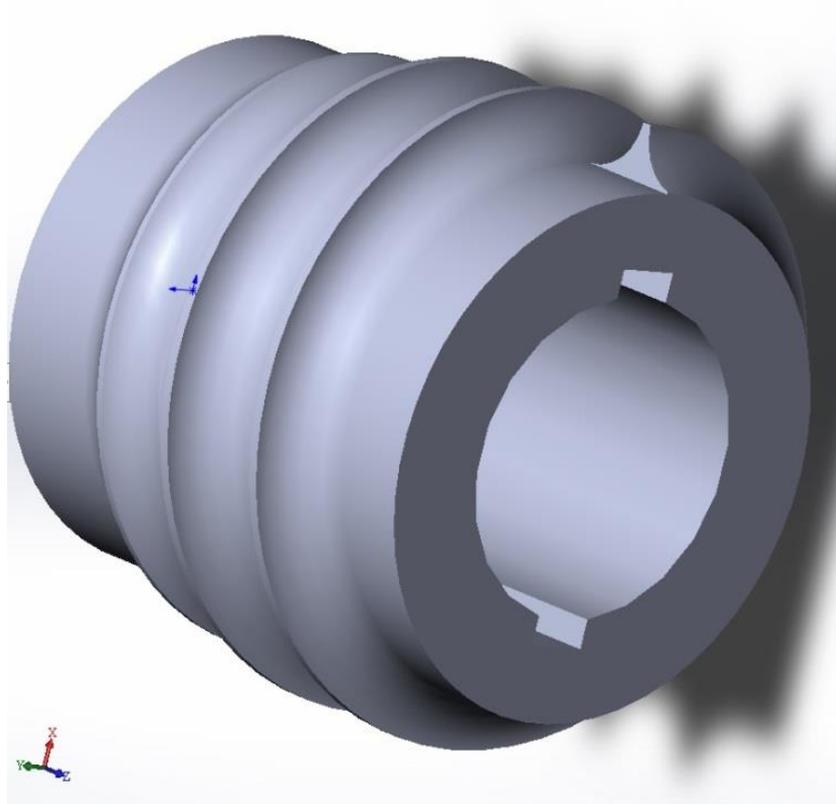


Рисунок П.7. 3-D модель валка

Готовая 3-D модель с непрерывно-изменяющимся шагом (рисунок П.7.) может быть в дальнейшем использована для изготовления шаропрокатного валка на обрабатывающем центре. Рабочий чертеж модели представлен в приложении 2 к «Акту о результатах проведения опытной прокатки»

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Использование результатов диссертационной работы в условиях производства

УТВЕРЖДАЮ:  
Начальник рельсобалочного цеха  
К.А. Улегин  
«30» апреля 2018 г.

АКТ

О результатах проведения опытной прокатки

Акционерное общество «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»  
«30» апреля 2018 г.

4 апреля 2018 года на участке шаропрокатного стана рельсобалочного цеха была проведена опытная прокатка мелющих шаров условным диаметром 120 мм. Были использованы шаропрокатные валки, изготовленные на фрезерном 5-координатном обрабатывающем центре, по 3-D модели, согласно чертежу 013Ш-00215 (разработчик Рубцов В.Ю.). Профиль валков, имеет постоянную ширину реборды 11 мм и непрерывно-меняющийся шаг, по функции сохранения постоянства объема.

По результатам опытной прокатки, полученный шар имеет геометрию в пределах  $125 \pm 0,4$  мм, что превышает требования ГОСТ 7524-2015.

Среди внешних дефектов – незначительный поясок (шириной до 5 мм, глубиной до 0,4 мм), незначительная плена со стороны полюса шаров, дефекты не выходят за предельные отклонения допуска.

Определено дальнейшее преимущество в использовании непрерывно-меняющегося шага с использованием функции сохранения постоянства объема.

Определено преимущество изготовления шаропрокатных валков на фрезерном 5-координатном обрабатывающем центре, с обеспечением непрерывно-меняющегося шага, взамен токарно-винторезных станков.

Главный калибровщик

Заместитель начальника  
рельсобалочного цеха по технологии

Начальник производственного участка  
шаропрокатного стана

Мастер производственного участка  
шаропрокатного стана

В.В. Свириденко

Н.М. Загребайлов

С.В. Борисов

В.Ю. Рубцов





## АКТ

Соответствия технического решения по патенту №2723342 заявка № 2019117608

С положительным решением от «04» августа 2020 г. технической документации

Комиссия в составе (не менее трех человек):

Егоров С.В. - начальник КСЦ;

Шкабара А.В. – заместитель начальника КСЦ по технологии;

Кузеванов Е.С. - ответственный за эксплуатацию;

Бальян В.Ж. – начальник бюро по УИС ТУ

Произвела анализ существенных признаков формулы изобретения

«Способ регулирования частоты вращения валков шаропрокатных станов»

патент №2723342, заявка № 2019117608

(приводится название изобретения или полезной модели, № патента, № заявки)

Авторы: Рубцов В.Ю.; Серебrenников А.А.; Шевченко О.И.; Замураев Д.А.

№ п/п	Признаки, содержащиеся в формуле изобретения, полезной модели	Признаки, используемые в объекте производства	Источник информации, подтверждающий наличие признака в объекте производства	Результат сопоставления признаков
1	2	3	4	5
1. Ограничительная часть				
1.1	Способ регулирования частоты вращения валков шаропрокатного стана, включающий изменение частоты вращения валков в процессе подачи заготовки в валки,	Частота вращения задается параметрами стана	ТИ-П-128-2020 Приложение Б	соответствует
1.2	прокатки заготовки	Прокатка заготовки производится в соответствии с ТИ-П-128-2020	ТИ-П-128-2020 Пункт. 7.4.	соответствует
1.3	и захвата последующей заготовки,	Подача заготовки производится одна за другой	ТИ-П-128-2020 Пункт. 7.4.1	соответствует
2. Отличительная часть				
2.1	отличающийся тем, что в период между прокаткой заготовки и захватом последующей заготовки при падении нагрузки снижают частоту вращения валков до 20-50% от рабочей частоты в зависимости от диаметров прокатываемой заготовки и валков стана,	Подача заготовок на стан производится поочередно одна за другой, после прокатки каждой заготовки частота вращения валков снижается на 25% от номинальной.	ТИ-П-128-2020 Пункт. 7.4.1	соответствует

2.2	а после захвата последующей заготовки и появления момента валка увеличивают частоту вращения валков до рабочей частоты,	После осуществлении захвата каждой заготовки возрастает до номинальной.	ТИ-П-128-2020 Пункт. 7.4.1.	соответствует
2.4	при этом изменение частоты вращения валков производят в автоматическом режиме в зависимости от фиксируемой нагрузки.	Регулирование частоты вращения – автоматическое (При прокатке шаров на стане СПШ 8-120 частота вращения валков регулируется в автоматическом режиме)	ТИ-П-128-2020 Приложение Б Пункт. 7.4.1	соответствует

И установила, что все существенные признаки технического решения, изложенного в первом пункте формулы изобретения (полезной модели) **«Способ регулирования частоты вращения валков шаропрокатных станов» Патент №2723342 заявка № 2019117608** (приводится название изобретения или полезной модели, номер патента, номер заявки)

Соответствует существенным признакам: ТИ-П-128-2020 от 28.07.2020 г. п.7.4, приложение Б.

(указать анализируемую техническую документацию, наименование документа, его номер, дату утверждения, номер заказа)

Члены комиссии:  
Начальник КСЦ



С.В. Егоров

Заместитель начальника КСЦ по технологии

А.В. Шкабара

Начальник производственного участка шаропрокатного стана (ответственный за эксплуатацию изобретения)

Е.С. Кузеванов

Начальник Бюро по УИС ТУ



В.Ж. Бальян

Примечание - В состав комиссии включаются:

1. Главный специалист (по направлению деятельности).
2. Руководитель структурного подразделения, разработавшего документацию.
3. Ответственный за эксплуатацию.
4. Начальник Бюро по УИС ТУ.



АКТ

## Об использовании изобретения (полезной модели)

Акционерное общество «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»  
«01» августа 2020 г.

Номер патента № 2723342 от 09.06.2020 (Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ)

Номер заявки 2019117608 от 06.06.2019

Наименование изобретения (полезной модели) «Способ регулирования частоты вращения валков шаропрокатных станов»

Авторы изобретения (полезной модели): Рубцов В.Ю.; Серебrenиков А.А.; Шевченко О.И.; Замураев Д.А.

Данный объект интеллектуальной собственности соответствует первому пункту формулы изобретения, после проведенного испытания признается годным и с

«1» августа 2020 г. используется на участке шаропрокатного стана крупносортового цеха.

(указывается цех, участок, механизм, сооружение)

Ответственность за дальнейшее использование изобретения (полезной модели) возлагается на начальника участка шаропрокатного стана крупносортового цеха Кузеванова Евгения Сергеевича., 49-05-52

(указывается должность, Ф.И.О., телефон ответственного, который обязан при прекращении использования поставить в известность Бюро по УИС ТУ)

Начальник КСЦ

Начальник производственного участка шаропрокатного стана (ответственный за эксплуатацию изобретения)

Начальник ТУ

Начальник Бюро по УИС ТУ



С.В. Егоров

Е.С. Кузеванов

К.Н. Шведов

В.Ж. Бальян



Акционерное общество «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор ЕВРАЗ-НТМК

Д.А. Кошкарлов

« 25 » 08 2020 г.

АКТ

О результатах внедрения инициатив на участке ШПС

«03» августа 2020 г.

За 2019 год на участке шаропрокатного стана были реализованы следующие инициативы:

1. «Увеличение производства ШПС за счет снижения плановых простоев на настройку стана при увеличении стойкости валков» ЭВНТ20-ПИ/003 с суммарным экономическим эффектом за 2019 год в размере 22,33 млн рублей (7,2 млн. рублей за счет эффекта от сокращения используемых валков; 15,13 млн. рублей за счет эффекта от увеличения производства ШПС).

2. «Увеличение производства ШПС за счет снижения плановых простоев при замене проводок» ЭВНТ20-ПИ/0050 с суммарным экономическим эффектом за 2019 год от увеличения производства ШПС в размере 10,82 млн. рублей.

В обеих инициативах калибровщик РБЦ Рубцов В.Ю. принимал непосредственное участие, с предоставлением научного обоснования использования режимов работы, настройки стана, повлиявших на увеличение стойкости валков, а также обоснование максимально-возможного увеличения ширины рабочей части направляющих проводок для увеличения их ресурса и тем самым на уменьшение простоев стана по причине их замены.

Начальник рельсобалочного цеха

К.А. Улегин

Начальник Бюро по УИС ТУ

В.Ж. Бальян

Заместитель начальника рельсобалочного цеха по технологии

С.А. Рошупкин