

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



**Байдин Вадим Викторович**

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО  
ПРОИЗВОДСТВА КАТАНЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ПОВЫШЕННОЙ  
ТВЕРДОСТИ И УДАРНОЙ СТОЙКОСТИ**

Специальность

2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Уманский Александр Александрович

Новокузнецк

2025 г.

## Оглавление

Введение.....	4
1 Современные технологические решения при производстве стальных мелющих шаров с повышенными эксплуатационными характеристиками.....	13
1.1 Анализ требований к параметрам качества и характеристикам мелющих шаров.....	13
1.2 Технологические схемы и оборудование для производства катаных мелющих шаров.....	21
1.3 Направления и результаты совершенствования химического состава и режимов термомеханической обработки мелющих шаров.....	31
1.4 Анализ опыта применения математического моделирования для совершенствования технологии производства мелющих шаров.....	41
1.5 Выводы и постановка задач исследования.....	46
2 Исследование и разработка энерго- и металлосберегающих режимов производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости..	49
2.1 Исходные условия и обоснование направлений проведения исследований.....	49
2.2 Исследования влияния химического состава и температурного режима прокатки мелющих шаров на показатели их качества.....	54
2.3 Разработка и опытно-промышленное опробование энерго- и ресурсосберегающих режимов производства мелющих шаров, обеспечивающих повышение их твердости и ударной стойкости.....	61
2.4 Выводы.....	69
3 Исследования деформационных характеристик экспериментальных легированных сталей для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и ударной стойкости.....	71

3.1 Обоснование химического состава и исследование особенностей структуры и свойств экспериментальных сталей на технологических этапах производства мелющих шаров.....	71
3.2 Исследования сопротивления пластической деформации сталей экспериментального химического состава.....	82
3.3 Выводы.....	90
4 Разработка и опытно-промышленное опробование технологических режимов производства мелющих шаров высокой объемной твердости и ударостойкости.....	92
4.1 Обоснование объекта и характеристика условий проведения промышленных исследований.....	92
4.2 Исследование и совершенствование режимов прокатки мелющих шаров.....	96
4.4 Исследования качества мелющих шаров и обоснование направлений совершенствования режимов их термической обработки.....	105
4.4 Выводы.....	111
Заключение.....	113
Библиографический список.....	116
Приложение А.....	133
Приложение Б.....	134

## Введение

### **Актуальность работы.**

Мелющие (помольные) шары применяются в качестве измельчающей среды в барабанных мельницах при дроблении широкой номенклатуры сырья и материалов в различных отраслях промышленности, в том числе в металлургической, горнорудной, цементной промышленности. Объем потребления помольных шаров в России оценивается на уровне порядка 500 тыс. т/год. Основная масса помольных шаров, как в России, так и в мировой металлургии производится из стали. При этом, несмотря на широкое многообразие методов производства стальных мелющих шаров, включая литье, поперечно-винтовую и поперечно-клиновую прокатку, штамповку, наибольшую долю в общей структуре производства занимают шары, полученные на станах поперечно-винтовой прокатки.

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция по повышению требований потребителей к основным характеристикам качества мелющих шаров, а именно к их поверхностной и объемной твердости, устойчивости к абразивному износу и ударным нагрузкам. Данный факт обусловлен тем, что удельный расход помольных шаров, напрямую зависящий от вышеуказанных параметров их качества, оказывает значительное влияние на уровень затрат при подготовке сырья и материалов к основному производству, а следовательно и на себестоимость готовой продукции.

С целью обеспечения повышенных требований к твердости, износостойкости и ударостойкости мелющих шаров металлургическими предприятиями, являющимися производителями данного вида продукции, интенсивно развиваются направления по совершенствованию химического состава и технологических режимов производства шаров на различных этапах технологического цикла, включая прокатку и термическую обработку шаров. При этом объективную сложность по-прежнему представляет организация массового рентабельного производства мелющих шаров высокой поверхностной и объемной

твердости (шары 4-й и 5-й групп твердости по ГОСТ 7524), одновременно обладающих повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам. Данный факт в значительной степени связан с недостаточным развитием теоретической базы для совершенствования технологии производства мелющих шаров, что затрудняет разработку новых и адаптацию известных технологических решений для условий конкретных шаропрокатных станов.

Таким образом, выбранное направление по разработке научно-обоснованных технологических решений энерго- и ресурсосберегающего производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости является актуальным.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Несмотря на наличие в литературных источниках значительного количества работ, направленных на повышение твердости и ударной стойкости мелющих шаров за счет совершенствования их химического состава, режимов их прокатки и термической обработки, необходимо констатировать, что практически все подобные исследования носят частный характер и имеют крайне ограниченную область применения. Рекомендации по оптимизации химического состава и параметров производства шаров, основанные на результатах таких исследований, зачастую противоречат друг другу и в подавляющем большинстве случаев не учитывают комплексного влияния предлагаемых изменений на технико-экономические показатели шаропрокатных производств, в том числе на изменение их ресурсо- и энергоемкости. Более комплексный и научно-обоснованный подход к выбору направлений совершенствования технологии производства мелющих шаров характерен лишь для ограниченного числа исследований. К таким исследованиям, проведенным в последние годы, можно отнести комплекс работ под руководством профессоров О.И. Шевченко и Д.Л. Шварца применительно к условиям нового шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК». Однако и указанные исследования имеют существенные ограничения по области применения с учетом специфических конструктивных и технологических особенностей анализируемого шаропрокатного стана. Ранее проведенные под

руководством академика А.И. Целикова теоретические и экспериментальные исследования позволили определить основные закономерности течения металла, формирования его напряженно-деформированного состояния в объеме шаров при поперечно-винтовой прокатке. Далее разработанные теоретические положения получили развитие в работах таких ученых, как В.И. Котенок, В.Н. Перетяtko и др. Однако в условиях современных промышленных прокатных станков с учетом значительного изменения требований к мелющим шарам применение указанных закономерностей на практике при разработке и совершенствовании режимов прокатки шаров требует проведения дополнительных детальных исследований.

**Работа выполнена** в рамках: гранта РФФИ №22-29-20170 «Разработка теоретических и технологических основ переработки отбраковки заготовок легированных рельсовых сталей в высокорентабельные мелющие шары повышенной твердости, износо- и ударостойкости», 2021-2022 гг.

**Цель работы:** Теоретическое обоснование и разработка ресурсосберегающих технологических режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров, обеспечивающих одновременное повышение их объемной твердости и ударостойкости.

**Задачи работы:**

- 1) провести исследования влияния химического состава и режимов прокатки мелющих шаров на показатели их твердости и ударной стойкости;
- 2) выполнить моделирование напряженного состояния металла и распределения температурных полей в объеме мелющих шаров при различных условиях их прокатки;
- 3) выполнить аналитические исследования влияния температурных параметров прокатки мелющих шаров на удельные расходы энергоресурсов, материалов и отбраковку мелющих шаров;
- 4) разработать энерго- и металлосберегающие режимы прокатки мелющих шаров высокой поверхностной твердости и устойчивости к ударным нагрузкам;
- 5) обосновать химический состав экспериментальных сталей для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и выполнить

исследования структуры и свойств таких сталей на различных технологических стадиях производственного цикла;

б) провести исследования сопротивления деформации сталей экспериментального химического состава при варьировании термомеханических параметров их прокатки;

7) разработать режимы прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров из экономнолегированной стали, обеспечивающие производство мелющих шаров высокой поверхностной и объемной твердости, одновременно обладающих повышенной ударной стойкостью.

### **Научная новизна:**

1. Определены и научно обоснованы закономерности и механизмы влияния химического состава стандартных и экспериментальных сталей, применяемых для производства мелющих шаров повышенной твердости, на сопротивление сталей пластической деформации. В частности установлено, что при дополнительном микролегировании ванадием происходит значительное (на 19-20%) увеличение сопротивления деформации сталей с широким диапазоном изменения содержания марганца, хрома и никеля. Определено значимое влияние увеличения содержания углерода, марганца, хрома и никеля в сталях на повышение их сопротивления деформации вне зависимости от температурно-скоростных параметров прокатки.

2. Получены новые данные о влиянии температуры деформации и калибровки валков при поперечно-винтовой прокатке шаров различного химического состава на формирование схемы напряженного состояния металла и величину максимальных точечных напряжений в локальных зонах контакта поверхности шаров с ребордой валков. Определено значительное снижение интенсивности напряжений в указанных зонах при повышении температуры прокатки шаров и использовании калибровки с непрерывно-изменяющейся высотой реборды.

3. Установлена возможность производства и обоснованы режимы прокатки и термической обработки мелющих шаров высокой объемной твердости и ударостойкости из стали опытного химического состава, легированной марганцем

и хромом и дополнительно микролегированной ванадием.

### **Практическая значимость работы:**

1. Разработан и внедрен энерго- и материалосберегающий температурный режим прокатки мелющих шаров из стандартной стали оптимизированного химического состава, обеспечивающий получение шаров высокой поверхностной твердости и повышенной ударной стойкости. Опытно-промышленное опробование нового режима прокатки показало его эффективность с точки зрения повышения показателей твердости и ударной стойкости мелющих шаров при одновременном снижении расходов электроэнергии и прокатных валков (подтверждено Справкой об использовании результатов в производстве).

2. Получено уравнение регрессии, устанавливающее комплексное влияние химического состава сталей для производства мелющих шаров и параметров их деформации на сопротивление пластическому деформированию. Подтвержденная адекватность указанного уравнения для производственных условий создает возможность его применения при разработке и совершенствовании режимов прокатки мелющих шаров из новых марок сталей широкого номенклатурного ряда.

3. Разработана и прошла опытно-промышленное опробование новая калибровка валков шаропрокатного стана для производства мелющих шаров большого диаметра, обеспечивающая уменьшение износа реборд за счет снижения интенсивности напряжений в процессе деформации (подтверждено Справкой об использовании результатов в производстве).

4. Разработаны и прошли опытно-промышленное опробование режимы прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров из экономнолегированной стали экспериментального химического состава, обеспечивающие получение шаров повышенной объемной твердости и ударостойкости (подтверждено Справкой об использовании результатов в производстве).

5. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и используются в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный

университет» при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» (подтверждено Справкой).

### **Методология и методы исследования.**

Для исследований особенностей формирования схемы напряженного состояния металла и распределения температурных полей по поверхности шаров при их прокатке по различным режимам использовали моделирование в прикладном программном комплексе DEFORM. Экспериментальные исследования сопротивления пластической деформации сталей опытного химического состава для производства мелющих шаров проводили на лабораторной установке методом горячего кручения образцов. Исследования процессов формирования структуры и свойств мелющих шаров из опытных сталей по стадиям производства проводили в лабораторных условиях путем последовательного нагрева, горячей прокатки и термической обработки образцов. Исследования по определению влияния химического состава сталей и температурных режимов поперечно-винтовой прокатки на показатели твердости и ударной стойкости мелющих шаров, а также на показатели энерго- и материалоемкости производства проводили в условиях промышленного шаропрокатного стана 40-100. Металлографический анализ структуры образцов в ходе экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях проводили методом оптической микроскопии (микроскоп «OLIMPUS – GX 51»); химический состав образцов определяли методами спектрального анализа (рентгенофлуоресцентный спектрометр «Shimadzu XRF-1800» и атомно-эмиссионный спектрометр ДФС-71); для замера твердости образцов использовали твердомер ТК-2М. Статистическую обработку результатов экспериментальных исследований проводили с использованием программы «MATLAB». Натурные эксперименты по опытно-промышленному опробованию производства заготовок для мелющих шаров из новых марок экономнолегированных сталей проводили в условиях непрерывного среднесортного стана «450» и универсального рельсобалочного стана; эксперименты по опробованию новых режимов прокатки и термомеханической обработки шаров из экономнолегированной стали

оптимизированного химического состава – в условиях шаропрокатного стана 40-100.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния химического состава и температуры прокатки мелющих шаров на их твердость и ударостойкость.

2. Закономерности распределения интенсивности напряжений на поверхности шаров в процессе их поперечно-винтовой прокатки в зависимости от температурных условий деформации.

3. Результаты исследований влияния температурных режимов прокатки мелющих шаров на показатели энергоэффективности, материало- и металлосбережения.

4. Энерго- и металлосберегающий режим прокатки мелющих шаров высокой поверхностной твердости и ударной стойкости из стандартной стали оптимизированного химического состава.

5. Результаты исследований структуры и свойств экспериментальных сталей для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и ударостойкости на различных стадиях технологического цикла;

6. Закономерности влияния химического состава экспериментальных сталей и параметров их деформации на сопротивление сталей пластическому деформированию в процессе прокатки.

7. Режим прокатки, в том числе калибровка прокатных валков и режим термомеханической обработки мелющих шаров из экономнолегированной стали для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и ударной стойкости.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности

2.6.4. Обработка металлов давлением по следующим пунктам:

- п. 1 «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых,

температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов»;

- п. 2 «Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»;

- п. 4 «Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции»;

- п. 6 «Разработка способов, процессов и технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

**Личный вклад автора** заключается в обосновании выбора направлений и разработке плана исследований; личном участии в проведении теоретических и экспериментальных исследований; разработке новых режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости, обеспечивающих экономию энергетических и материальных ресурсов; обобщении результатов исследований и формулировании основных выводов по работе.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Подтверждением достоверности полученных результатов является: совместное и взаимодополняющее использование математического и физического моделирования, экспериментальных опытно-промышленных исследований в условиях действующего производства; применение поверенного в установленном порядке аналитического оборудования для анализа структуры и свойств мелющих шаров; использование современных прикладных программных комплексов для моделирования технологических режимов производства шаров и применение современного программного обеспечения для статистической обработки данных экспериментальных исследований; качественное совпадение результатов исследований с общепринятыми теоретическими представлениями; наличие

подтвержденного эффекта от использования разработанных технологических режимов производства мелющих шаров в условиях действующего промышленного шаропрокатного стана.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XXIII и XXIV Международные научно-практические конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2022 г. и 2024 г.); XVIII Международный Конгресс сталеплавателей и производителей металла (г. Санкт-Петербург, 2025 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Формирование программы социально-экономического развития Гурьевского муниципального округа на период 2026-2035 годы: Гурьевский округ на пути к 100-летию» (г. Гурьевск, 2025 г.); VII Международная научно-практическая конференция: «Современные тенденции развития науки: проблемы и перспективы в контексте глобальных вызовов» (г. Анапа, 2025 г.)

#### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 6 статей в журналах и сборниках трудов.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений и изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок, 29 таблиц, список литературы из 145 наименований.

# 1 Современные технологические решения при производстве стальных мелющих шаров с повышенными эксплуатационными характеристиками

## 1.1 Анализ требований к параметрам качества и характеристикам мелющих шаров

Требования к характеристикам мелющих шаров обусловлены их назначением и условиями эксплуатации и заключаются, прежде всего, в высокой твердости, повышенной устойчивости к ударным нагрузкам и абразивному износу.

В соответствии с основным нормативным документом на производство стальных мелющих шаров, межгосударственным стандартом ГОСТ 7524-2015 (действует на территории 7 стран Ближнего Зарубежья) [1], мелющие шары в зависимости от твердости после термической обработки подразделяются на пять групп (таблица 1.1):

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

При этом объемная твердость определяется по выражению:

$$OT = 0,289 \times T_{\text{ПОВ}} + 0,436 \times T_{0,25} + 0,203 \times T_{0,50} + 0,063 \times T_{0,75} + 0,009 \times T_{\text{Ц}}, \quad (1.1)$$

где OT – объемная твердость шара;  $T_{\text{ПОВ}}$ ,  $T_{0,25}$ ,  $T_{0,50}$ ,  $T_{0,75}$ ,  $T_{\text{Ц}}$  – твердость шара на поверхности, на расстоянии от поверхности 0,25, 0,5 и 0,75 радиуса шара и в центре шара соответственно.

Таблица 1.1 – Требования к твердости мелющих шаров по ГОСТ 7524-2015

Диаметр шара, мм	Минимальная твердость по группам, HRC						
	1	2	3	4		5	
	поверхность				на глубине 0,5 радиуса	поверхность	объемная
15-45	45	49	55	55	45	61	57
50-70	43	48	53	53	43	60	53
80-100	39	42	52	52	40	58	48
110-120	35	38	50	50	35	56	43

Регламентация твердости для мелющих шаров, как основного требования, является закономерной, так как повышение твердости снижает износ мелющих шаров в процессе эксплуатации, положительно сказывается на их удельном расходе в процессе измельчения сырья и материалов, а также позволяет повысить эффективность измельчения. Так по данным исследования [2] повышение твердости мелющих шаров в диапазоне от 20 HRC до 60 HRC приводит к снижению удельного износа мелющих шаров и увеличению выхода готового измельчаемого продукта нужного класса крупности, как при использовании «мокрого», так и «сухого» измельчения железистых кварцитов (рисунок 1.1).

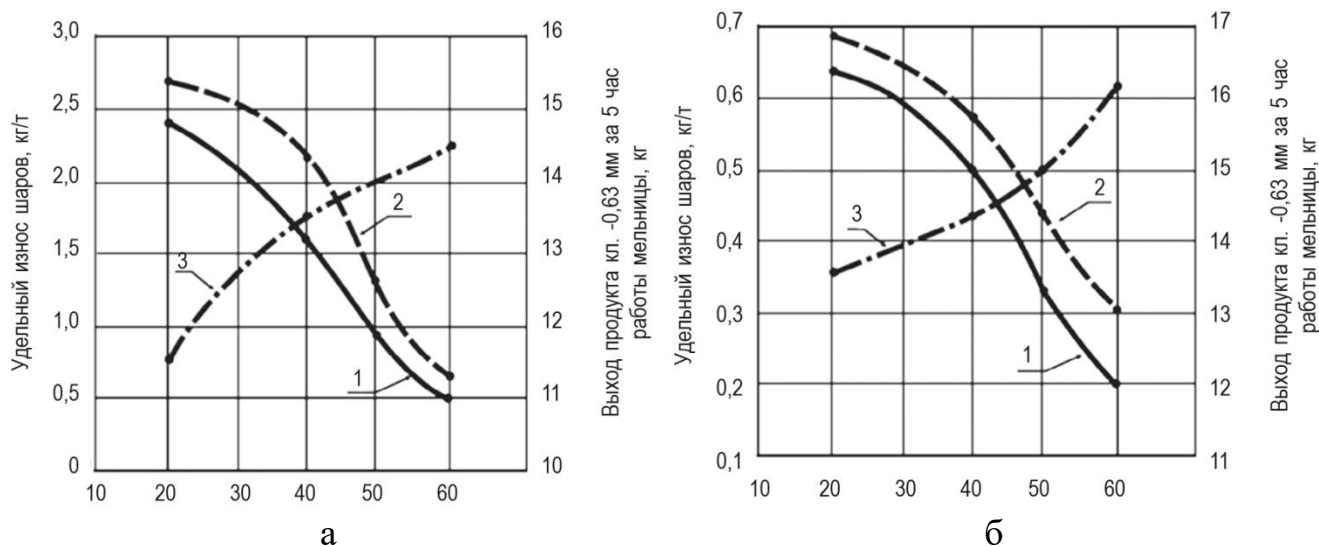


Рисунок 1.1 – Влияние твердости мелющих шаров на показатели измельчения железистых кварцитов при использовании технологии «мокрого» (а) и «сухого» (б) измельчения

Согласно полученных результатов [2] повышение твердости шаров с 40 до 50 HRC позволяет снизить их удельный износ в 1,8 и 1,5 раза для процессов

«мокрого» и «сухого» измельчения соответственно, а эффект от повышения твердости шаров с 40 до 60 HRC проявляется в снижении их удельного износа уже в 3,2 и 2,5 раза для указанных технологий измельчения железистых кварцитов.

По данным работы [3] использование мелющих шаров 4-ой группы твердости для измельчения железистых кварцитов позволяет уменьшить их удельный расход на 8,83 % по сравнению с базовым вариантом, а в случае применения шаров 3-ей группы твердости их удельный расход наоборот возрастает на 1,5%. Согласно результатов указанной работы [3] эффективность измельчения для шаров 4-ой группы твердости также выше по сравнению с шарами 3-ей группы – возрастает относительно базового варианта на 3,1% и 1,37% соответственно.

Твердость мелющих шаров закономерно зависит от их химического состава. При этом, однако, ГОСТ 7524-2015 установлены требования только к минимальному содержанию углерода в стали и к минимальному значению углеродного эквивалента (таблица 1.2), определяемому по формуле:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + Mn / 6 + Si / 24 + Cr / 5 + (Ni+Cu) / 40 + V / 14 \quad (1.2)$$

где  $C_{\text{ЭКВ}}$  – углеродный эквивалент, %; C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V – содержание углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия в шарах соответственно.

Таблица 1.2 – Требования к химическому составу шаров по ГОСТ 7524-2015

Диаметр шаров, мм	Группа твердости	C	$C_{\text{ЭКВ}}$
		Не менее, %	
15-55	1, 2, 3	0,40	0,50
	4, 5	0,60	0,70
60-70	1, 2, 3	0,45	0,55
	4, 5	0,60	0,75
80-120	1, 2, 3	0,50	0,70
	4, 5	0,60	0,80

Кроме того, в соответствии Изменением №1 к ГОСТ 7524-2015, введенном

в действие с 01.10.2023 г., требования к химическому составу стали для производства мелющих шаров еще более смягчены. В соответствии с указанным изменением для всех групп твердости допускается изготовление шаров без учета норматива по содержанию углерода в стали при обеспечении необходимой твердости шаров. Также ГОСТ 7524-2015 допускается изготовление мелющих шаров из сталей по ГОСТ 5950 (инструментальные легированные стали) и по ГОСТ 19595 (рессорно-пружинные легированные и нелегированные стали).

Исходя из требований вышеуказанного ГОСТа мелющие шары могут изготавливаться из широкого перечня углеродистых и легированных марок стали, что подтверждается фактическим опытом производства данного вида продукции на различных металлургических предприятиях России и стран Ближнего Зарубежья. Например, для запущенного в эксплуатацию в 2017-2018 гг. на «ЕВРАЗ НТМК» нового шаропрокатного стана рекомендованной маркой стали для производства шаров диаметром 120 мм 5-ой группы твердости является сталь 75ХГФН на основе марки 76ХГФА [4]. При этом соответствие шаров указанного диаметра требованиям ГОСТа для 5-ой группы твердости также выполняется и при использовании стали 70ХГС [5]. На «Донецком металлопрокатном заводе» освоено производство шаров диаметром 40 мм 5-ой группы твердости из стали марки 85 [6], при этом для производства шаров этого же диаметра 3-ей и 4-ой групп твердости используется сталь 75 [7]. На этом же предприятии проведены успешные испытания производства шаров диаметром 40 мм 4-ой группы твердости из стали 55, экономнолегированной хромом [8]. На многих предприятиях производство мелющих шаров осуществляется из специализированных сталей, химический состав которых определяется внутренними нормативными документами по согласованию с заказчиками (технические условия – ТУ, и т.д.). Имеется успешный опыт массового производства мелющих шаров из рельсовых сталей [9], шарикоподшипниковых сталей (ШХ15) [10], а также из сталей экспериментального химического состава [11-14].

Несмотря на то, что ударостойкость мелющих шаров является одним из

важных показателей, определяющих их срок службы и удельный расход, данный показатель в ГОСТ 7524-2015 не регламентирован. В соответствии с требованиями указанного стандарта контроль ударостойкости может быть предусмотрен для шаров 4-ой и 5-ой групп твердости по согласованию между изготовителем и потребителем и при этом методика контроля ударостойкости определяется изготовителем.

Согласно общепринятых представлений ударная стойкость мелющего шара определяется, как суммарная энергия удара при цикле испытаний, которую он должен воспринять без разрушения. Наиболее распространённой методикой проведения испытаний на ударную стойкость являются испытания на копровых установках (рисунок 1.2 а), основанные на принципе воздействия на шар свободно падающим грузом. При этом высота подъема и масса груза, а также количество ударов определяются в зависимости от диаметра и группы твердости шара. Суммарная энергия удара при копровых испытаниях определяется по формуле [15]:

$$E_{\Sigma} = E_{\text{ЕД}} \times n = m \times g \times h \times n, \quad (1.3)$$

где  $E_{\Sigma}$ ,  $E_{\text{ЕД}}$  – суммарная энергия и энергия единичного удара соответственно, Дж;  
 $n$  – количество ударов;  $m$  – масса груза, кг;  $h$  – высота подъема груза, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ).

На практике применяются также и другие методики испытаний шаров на ударную стойкость. В частности в АО «ЕВРАЗ НТМК» разработана установка, в основу которой положен гидравлический молот [16] – рисунок 1.2 б. Принцип проведения испытаний на данной установке заключается в многократном соударении между собой двух шаров на протяжении всего времени испытания. При проведении испытаний частота ударов составляет от 60 до 450 в минуту [15, 16]. Суммарная энергия удара определяется из выражения:

$$E_{\Sigma} = E_{\Sigma\text{МИН}} \times t = E_{\text{ЕД}} \times n \times t, \quad (1.4)$$

где  $E_{\Sigma}$ ,  $E_{\Sigma\text{МИН}}$  – суммарная энергия удара и суммарная энергия работы молота за минуту соответственно, Дж;  $E_{\text{ЕД}}$  – энергия единичного удара, Дж;  $n$  – количество ударов;  $t$  – продолжительность проведения испытаний, мин.

К преимуществам данного метода испытаний можно отнести, прежде всего, более полную имитацию работы шаров в производственных условиях, то есть в шаровых мельницах при измельчении материалов, а также снижение временных затрат на проведение испытаний.



а



б

Рисунок 1.2 – Установки для испытаний мелющих шаров на ударную стойкость шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК»:

а – копровая установка; б – молот

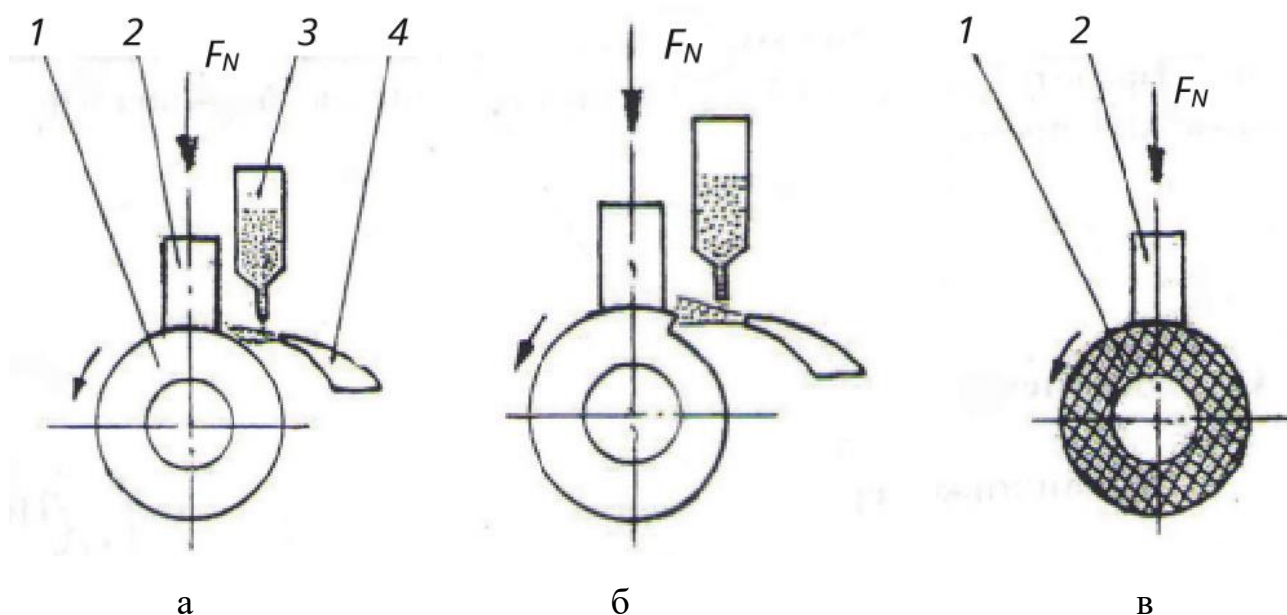
Еще одним методом испытаний является способ, при реализации которого происходит падение шара с высоты на термообработанную пластину, либо его падение на шары, стационарно зафиксированные в установке. В этом случае суммарная энергия удара определяется по формуле (1.3), при этом в качестве массы груза выступает масса самого испытываемого шара. Необходимо отметить, что данная методика испытаний позволяет наиболее полно имитировать условия эксплуатации шаров в шаровых мельницах, что является ее преимуществом. Однако существенным недостатком применения указанного метода является значительная продолжительность испытаний, то есть низкая пропускная способность установки. Например, согласно данным работы [17]

продолжительность испытаний одного шара диаметром 120 мм на установке Mintek (ЮАР) составляет порядка 24 часов.

Касательно методики определения ударостойкости в ряде работ предлагается определять данный показатель не только на поверхности шара, но и дополнительно на глубине, составляющей 0,75, 0,50 и 0,25 радиуса шара [18].

Показателем, который наряду с твердостью и ударной стойкостью определяет эффективность применения мелющих шаров для измельчения материалов, является устойчивость к абразивному износу или износостойкость. Данный показатель в действующей нормативной документации не регламентирован и, более того, в ГОСТ 7524-2015 даже отсутствует какое-либо упоминание о данной характеристике. Это связано, прежде всего, со сложностью и значительными временными затратами определения износостойкости мелющих шаров. Для получения адекватных результатов необходимо соблюдение условия, когда вид поверхности изнашивания образца должен быть максимально приближен к виду поверхности мелющего шара при работе в мельнице.

С учетом указанного условия авторами работы [19] предложена методика оценки износостойкости сталей с использованием лабораторной экспериментальной установки, базой для создания которой явилась стандартная машина для испытания на износ МИ-1М. Авторами опробованы три схемы испытаний, в первой из которых образец изнашивается об абразивную прослойку (рисунок 1.3 а), подаваемую между гладким контртелом и образцом; вторая схема аналогична первой, с тем отличием, что на контртеле имеется выступ, соскальзывая с которого образец ударяет по абразиву и измельчает его (рисунок 1.3 б); при использовании третьей схемы взамен стального контртела применяется абразивный круг Э9А15Б, воспроизводя трение образца о закрепленный абразив (рисунок 1.3 в) [19]. Наиболее адекватные результаты были получены при использовании третьей схемы, что подтверждено минимальным разбросом данных, наличием линейной зависимости приведенной износостойкости от твердости образцов и анализом поверхности образцов после испытаний.



1 – контртело; 2 – образец; 3 – дозатор с кварцевым песком;  
 4 – устройство подачи водовоздушной смеси  
 Рисунок 1.3 – Схемы методов испытаний на износ мелющих шаров [19]

Касательно требований к качеству поверхности мелющих шаров можно констатировать, что в соответствии с действующим ГОСТ 7524-2015 регламентируются только размеры поверхностных дефектов. Данные дефекты не должны выводить размеры шаров за пределы допустимых отклонений по геометрическим размерам. При этом предельные отклонения от номинального диаметра шаров составляют: для шаров диаметром 15-25 мм –  $\pm 1,0$  мм; диаметром 30-45 мм –  $\pm 2,0$  мм; диаметром 50-80 мм –  $\pm 3,0$  мм; диаметром 90-100 мм –  $\pm 4,0$  мм; диаметром 110-120 мм –  $\pm 5,0$  мм.

В работе [20] предложено производить мелющие шары пятой группы твердости с повышенной точностью по геометрическим размерам – с фактическим уменьшением допустимых отклонений на величину порядка 2 раз относительно вышеуказанных требований ГОСТ 7524-2015. При этом данное изменение авторы аргументируют тем, что значительные отклонения от профиля шара после термической обработки приводят к возникновению значительных внутренних напряжений, которые повышают риск образования трещин и разрушения шаров.

Необходимо отметить, что наличие и допустимые размеры внутренних

дефектов шаров в стандарте не регламентируются, несмотря на имеющиеся данные различных исследователей [21-25] о значительном влиянии таких дефектов на снижение ударостойкости мелющих шаров.

## **1.2 Технологические схемы и оборудование для производства катаных мелющих шаров**

На сегодняшний день стальные мелющие шары производятся методами литья, прокатки, либо штамповки. При этом порядка 2/3 шаров в мировой металлургии производится на специализированных станах поперечно-винтовой прокатки [26], что обусловлено, прежде всего, более высокой производительностью такого оборудования. Кроме этого, шары произведенные методом поперечно-винтовой прокатки, обладают более высоким качеством поверхности, что в частности подтверждено сравнительным анализом катаных и кованных мелющих шаров диаметром 25-30 мм ф. «Fagersta» (Швеция) [12].

В России имеет место аналогичная картина – массовое производство мелющих шаров осуществляется на станах поперечно-винтовой прокатки на крупных металлургических заводах и комбинатах: ООО «Гурьевск-Сталь» (Гурьевский металлургический завод), АО «ЕВРАЗ ЗСМК», АО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «Северсталь». При этом стальные мелющие шары диаметром до 90 мм в ограниченных объемах производятся методом горячей штамповки на подшипниковых заводах в Курске и Вологде [26]. Методы литья используются, в основном, для производства мелющих шаров из чугуна [27-32], так как в этом случае применение данного метода является экономически оправданным.

Технологическая схема производства мелющих шаров на станах поперечно-винтовой прокатки вне зависимости от сортамента включает в себя следующие основные стадии: нагрев исходных заготовок круглого поперечного сечения под прокатку; непосредственно сама прокатка; термическая обработка шаров.

Нагрев заготовок может осуществляться, как в печах отапливаемых газом, либо мазутом, так и в индукционных печах. При этом наиболее широкое

применение получили газовые печи, работающие, как правило, на смеси природного, доменного и коксового газов в различном соотношении. Данный факт обусловлен тем, что большинство шаропрокатных станов работают в составе металлургических комбинатов, включающих доменное и коксохимическое производства. Получаемый на данных производствах в качестве побочного продукта газ имеет низкую стоимость, что положительно сказывается на себестоимости прокатной продукции. Мазутные печи функционируют, в основном, в составе заводов, где отсутствует дешевое газообразное топливо, например Гурьевский металлургический завод.

В последние годы получают распространение индукционные печи, обладающие целым рядом существенных преимуществ по отношению к нагревательным печам, работающим на газовом либо мазутном топливе, в том числе:

- высокий КПД (60-70% по сравнению с 10-15% у газовых печей);
- низкая величина потерь металла в виде угара и окалина (в 2-4 раза меньше чем в газовых и мазутных печах);
- повышение качества производимого проката и увеличение срока службы прокатных валков на 20-30%, вследствие снижения окалинообразования (непластичная и твердая окалина на поверхности раскатов приводит к повышенному износу калибров прокатных валков).

Примером оснащения шаропрокатного комплекса индукционной печью для нагрева заготовок являются шаропрокатные станы 20-60 и 30-60, введенные в эксплуатацию в ПАО «Северсталь» в 2014 г. и в 2017 г. соответственно [33]. При этом первый из указанных шаропрокатных станов спроектирован ВНИИМЕТМАШ, а поставщиком оборудования второго стана выступила китайская компания «Wisdri».

Прокатные клетки, применяемые на станах поперечно-винтовой прокатки шаров, различаются диаметром валков и их калибровкой. Находят применение, как однозаходная калибровка, когда за каждый оборот валков прокатывается только один шар, так и многозаходная калибровка, отличающаяся тем, что за один

оборот валков производится несколько шаров и число шаров при этом равно числу заходов винтового калибра. При этом фактически в условиях одного шаропрокатного стана могут применяться разные типы калибровок для производства шаров различного диаметра. Так, например, на шаропрокатном стане АО «ЕВРАЗ НТМК» для производства мелющих шаров диаметром 100 мм используются валки с двухзаходной калибровкой, а для прокатки шаров диаметром 120 мм – с однозаходной калибровкой [34]. Необходимо отметить, что существуют многократно опробованные и эффективные методики расчета, как однозаходной, так и многозаходной калибровок валков шаропрокатных станов [35-40]. На основании таких методик успешно разрабатываются новые калибровки валков для производства мелющих шаров, применение которых позволяет повысить качество поверхности и структуры шаров, повысить энергоэффективность производства шаров и увеличить производительность прокатных станов [41-48].

В качестве примера можно привести методику расчета калибровки, представленную в работах [45, 46]. Согласно указанной методике предварительный этап включает в себя определение следующих характеристик:

1) диаметр калибра:

$$d_k = d_{ш} \times \eta_t, \quad (1.5)$$

где  $d_{ш}$  – диаметр шара, мм;  $\eta_t$  – коэффициент температурного расширения;

2) минимальная ширина реборды валков:

$$a = 0,04 \times \frac{d_k}{2} + 1,3; \quad (1.6)$$

3) начальная высота реборды валков:

$$h_0 = 1,5 + 0,07 \times \left( \frac{d_k}{2} - 10 \right); \quad (1.7)$$

4) величина минимального радиуса перемычки:

$$r = 1 + 0,04 \times \left( \frac{d_k}{2} - 10 \right); \quad (1.8)$$

5) ширина реборды перед отрезкой:

$$a_{OTP} = 4 + 0,14 \times \left( \frac{d_K}{2} - 10 \right); \quad (1.9)$$

6) радиус перемычки в конце формовки:

$$r_{OTP} = r + \frac{d_K / 2 - h_0 - r}{a_\phi} \Delta\alpha, \quad (1.10)$$

где  $a_\phi$  – длина формующего участка калибра, мм;  $\Delta\alpha$  – угол разбивки калибра (принимается  $90^\circ$ );

7) изменение высоты реборды при повороте валка на угол  $\Delta\alpha = 90^\circ$ :

$$\Delta h = r_{OTP} - r; \quad (1.11)$$

8) высота реборды для каждого участка для каждого угла поворота валков через промежуток  $\Delta\alpha = 90^\circ$ :

$$h_{\alpha-90} = h_\alpha + \Delta h, \quad (1.12)$$

где  $h_\alpha$  – высота реборды на предшествующем участке;

9) радиус перемычки на формовочном участке:

$$r_{\alpha-90} = r_\alpha + \Delta h, \quad (1.13)$$

где  $r_\alpha$  – радиус перемычки на предшествующем участке (минимальный радиус соответствует радиусу перемычки на отделочном участке  $r = r_{\alpha(отд)}$ );

10) ширина сферического участка калибра:

$$C_\alpha = \sqrt{\left( \frac{d_K}{2} \right)^2 - r_\alpha^2}, \quad (1.14)$$

при этом  $C_{OTP} = C_{\alpha(отд)+90}$ , то есть ширина сферического участка отрезки принимается на угле поворота валка, предшествующем отделочному участку калибра;

11) основной шаг нарезки реборды:

$$\frac{T_{OCH}}{z} = 2 \times C_{OTP} + a_{OTP}, \quad (1.15)$$

где  $z$  – число заходов реборды валка;

12) ширина реборды на отделочном участке:

$$a_{отд} = T_{осн} - 2 \times C_{\alpha(отд)}; \quad (1.16)$$

13) объем металла в сферической части калибра:

$$V_{C\alpha} = \pi \times C_{\alpha} \times \left( \left( \frac{d_K}{2} \right)^2 - \frac{C_{\alpha}^2}{3} \right); \quad (1.17)$$

14) объем металла в перемычках:

$$V_{a\alpha} = \pi \times r_{\alpha}^2 \times a_{\alpha}; \quad (1.18)$$

15) объем шара с перемычками:

$$V_{ш} = \frac{4}{3} \times \pi \times \left( \frac{d_K}{2} \right)^3 + \pi \times r_{\alpha}^2 \times a_{\alpha}; \quad (1.19)$$

16) объем металла в цилиндрической части калибра:

$$V_{S\alpha} = V_{ш} - \left( \frac{V_{a\alpha}}{2} + V_{C\alpha} + \frac{V_{a\alpha-360}}{2} + V_{C\alpha-360} \right); \quad (1.20)$$

Полученные результаты предварительного этапа калибровки сводятся в таблицу.

Далее на основном этапе расчета калибровки производится проверка принятой ширины реборды для каждого угла поворота исходя из соблюдения условия соответствия вытяжки:

$$b_{\alpha} = \frac{V_{\alpha+90} - 2 \times (V_{C\alpha} - V_{C\alpha+90})}{\pi \times r_{\alpha}^2}. \quad (1.21)$$

Затем, исходя из соблюдения условия, что до момента отрезки перемычки ее ширина должна быть меньше ширины реборды производится перерасчет ширины реборды и объемов металла на участках калибра.

Ширина цилиндрического участка калибра:

$$S_{\alpha} = \frac{V_{S\alpha}}{\pi \times \left( \frac{d_K}{2} \right)^2}. \quad (1.22)$$

Ширина реборды:

$$a_{\alpha} = T_{осн} - 2 \times C_{\alpha} - S_{\alpha}. \quad (1.23)$$

Далее определяются шаги нарезки калибра:

$$t_{\alpha} = T_{OCH} - \frac{360}{\Delta\alpha} (S_{\alpha+90} - S_{\alpha}). \quad (1.24)$$

При этом, если полученное значение шага превышает предыдущее, то значения обоих шагов принимается равным их среднему значению.

На последнем этапе с учетом полученных значений шагов нарезки производится уточнение следующих показателей:

1) ширины цилиндрического участка калибра:

$$S_{\alpha} = \frac{(T_{OCH} - t_{\alpha})}{4} + S_{\alpha-\Delta\alpha}; \quad (1.25)$$

2) ширины реборды:

$$a_{\alpha} = T_{OCH} - 2 \times C_{\alpha} - S_{\alpha}; \quad (1.26)$$

3) объемов металла в перемычках и цилиндрической части:

$$V_{aa} = \pi \times r_{\alpha}^2 \times a_{\alpha}; \quad V_{s\alpha} = \pi \times \left(\frac{d_{\kappa}}{2}\right)^2 \times S_{\alpha}. \quad (1.27)$$

Далее проверяется заполнение калибров, которое по ходу прокатки должно приближаться к значению полного объема шара:

$$\sum V_{\alpha-360}^{\alpha} = \frac{V_{aa}}{2} + V_{C\alpha} + \frac{V_{aa-360}}{2} + V_{C\alpha-360}. \quad (1.28)$$

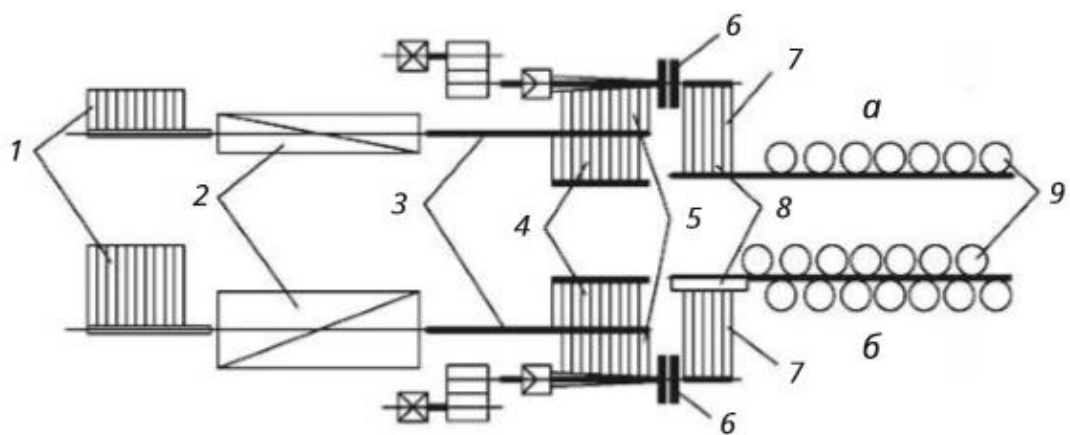
На основании полученных данных осуществляется построение графика изменения высоты реборды.

Калибровка, рассчитанная с использованием вышеприведенной методики внедрена в условиях шаропрокатного стана Гурьевского металлургического завода применительно к шарам диаметром 125 мм [46].

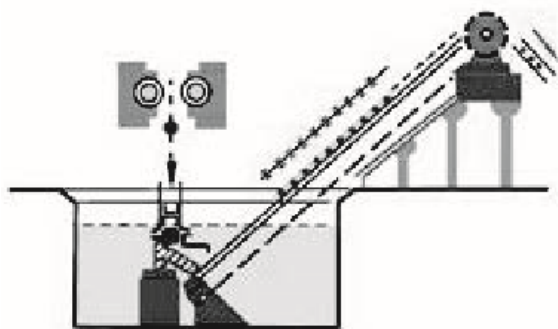
Термическая обработка мелющих шаров является одной из основных технологических стадий их производства, поскольку необходимым условием получения высокой твердости шаров является их закалка, а последующий отпуск обеспечивает устойчивость шаров к ударным воздействиям в процессе их эксплуатации. На первых типовых станах поперечно-винтовой прокатки шаров конструкции ВНИИМЕТМАШ (рисунок 1.4), запущенных в эксплуатацию на

ряде крупных отечественных металлургических предприятий в период начиная с 60-х гг. XX века, в частности на Нижнетагильском и Кузнецком металлургическом комбинатах (в настоящее время – «ЕВРАЗ НТМК» и «ЕВРАЗ ЗСМК»), термическая обработка шаров производилась на установках конвейерного типа (рисунок 1.5 а). В данном случае термическая обработка включает в себя закалку шаров в баке с проточной водой с последующим дополнительным охлаждением водой, подаваемой душирующим устройством, установленным над конвейером и затем самоотпуском шаров в бункерах. Существенным недостатком применения такого состава оборудования и технологии термической обработки являются значительная неравномерность распределения температуры в объеме шаров, которая обуславливает соответствующую структурную неоднородность и неравномерность твердости и, в конечном итоге снижает ударостойкость шаров. Кроме того, при использовании указанного оборудования фактически отсутствует возможность для регулирования режимов термической обработки в зависимости от марки стали и диаметра шаров, что закономерно в значительной доле случаев приводит к неоптимальной (завышенной) температуре закалки и не позволяет получать шары высокого качества.

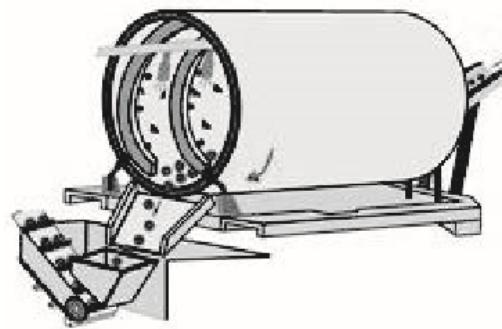
С учетом указанных недостатков на ряде отечественных шаропрокатных станов в 80-ые годы XX века проведена модернизация оборудования участков термообработки с заменой закалочных устройств конвейерного типа (рисунок 1.5 а) на барабанные закалочные устройства шнекового типа (рисунок 1.5 б), либо роторного типа (рисунок 1.5 в). Также, начиная с этого временного периода, вводимые в эксплуатацию новые шаропрокатные станы конструкции ВНИИМЕТМАШ оснащаются закалочными устройствами указанных новых типов. Например, линия термической обработки шаров новом шаропрокатном стане 20-60 ПАО «Северсталь» имеет в своем составе [33]: подстуживающее устройство барабанного типа, использующееся для усреднения температуры по сечению шара и охлаждения до заданной температуры перед закалкой; закалочное устройство роторного типа; специальный контейнер для самоотпуска.



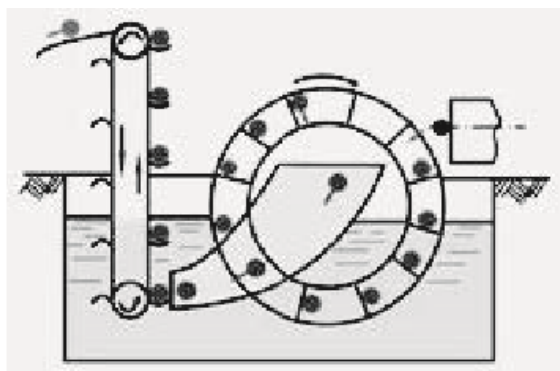
1 – загрузочные устройства; 2 – нагревательные печи; 3 – транспортные рольганги; 4 – решетки с карманами для бракованных заготовок; 5 – приемные решетки; 6 – рабочие клетки прокатных станов; 7 – закалочные устройства конвейерного типа; 8 – желоба с карманами; 9 – бункеры для шаров  
 Рисунок 1.4 – Состав и схема расположения оборудования шаропркатных станов 40-80 (а) и 80-120 (б)



а



б



в

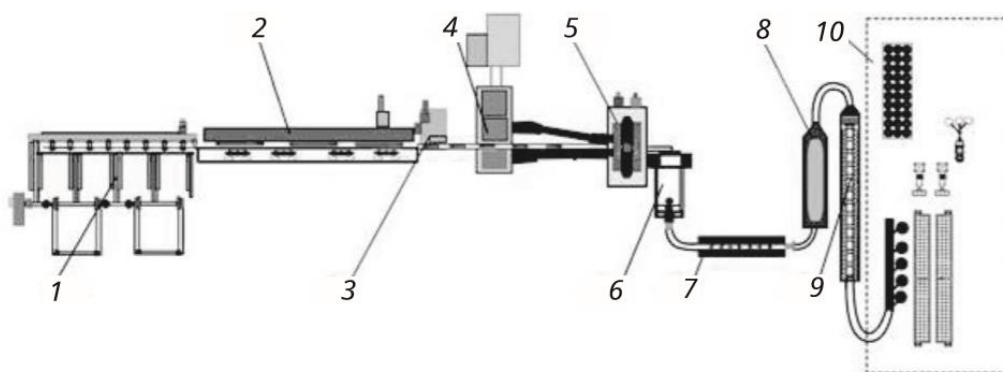
Рисунок 1.5 – Устройства для закалки мелющих шаров конвейерного (а) и барабанного (б) и роторного (в) типов

По мнению ряда исследователей более эффективным является проведение закалки мелющих шаров не с прокатного, а с отдельного нагрева, что

предполагает установку дополнительной нагревательной или подогревательной печи в линии стана между прокатной клетью и закалочным устройством.

Конечной операцией термической обработки шаров является их отпуск, имеющий основной целью снятие закалочных напряжений, что в конечном итоге обеспечивает ударостойкость мелющих шаров. При реализации технологии самоотпуска шаров зачастую происходит их растрескивание непосредственно в процессе охлаждения, либо через определенный промежуток времени. Более эффективным методом снятия закалочных напряжений является проведение низкого отпуска шаров, для чего современные шаропрокатные станы оборудуют специальными печами. Такая печь, например, имеется в составе шаропрокатного стана 60-100, введенного в эксплуатацию в ПАО «Северсталь» в 2020 г. [33]. Поставщиком оборудования данного стана выступил «Новокраматорский машиностроительный завод».

Авторами работы [12] предложена компоновка современного стана поперечно-винтовой прокатки, учитывающая лучшие практики на всех технологических стадиях производства мелющих шаров (рисунок 1.6).



- 1 – загрузочное устройство; 2 – индукционная установка для нагрева заготовок;
- 3 – тянущие ролики; 4 – главный привод прокатной клетки;
- 5 – прокатная клетка; 6 – устройство предварительного охлаждения шаров;
- 7 – нагревательная печь для повторного нагрева шаров под закалку;
- 8 – закалочное устройство; 9 – устройство для отпуска шаров

Рисунок 1.6 – Состав и расположение оборудования современного шаропрокатного комплекса

Согласно предложенной технологической схеме нагрев заготовок осуществляется в энергосберегающей индукционной установке. Далее заготовки

передаются к прокатной клетке, перед задачей в которую им с помощью специального устройства придается дополнительное вращение, что обеспечивает плавную задачу заготовок в винтовой калибр. На выходе из прокатной клетки шары подвергаются охлаждению до температуры аустенитного превращения при одновременном выравнивании их температуры по сечению в специальном устройстве. После охлаждения шары поступают в нагревательную печь, где осуществляется их повторный нагрев до температуры закалки. Затем шары поступают в закалочный агрегат, который обеспечивает их одновременное вращение и осевое перемещение в процессе закалки. Последней стадией является отпуск, производимый в отдельном агрегате.

Необходимо отметить, что мелющие шары могут производиться не только на станах поперечно-винтовой прокатки, но и на станах поперечно-клиновой прокатки (ПКП) [49]. При этом промышленное производство мелющих шаров на станах ПКП освоено значительно позже по сравнению со станами поперечно-винтовой прокатки. Так, если первый в мире промышленный стан поперечно-винтовой прокатки для производства шаров диаметром 25-50 мм был спроектирован отечественными учеными и конструкторами по ВНИИМЕТМАШ и запущен в эксплуатацию в 1954 г. на «Калининском заводе имени 1-ого мая», то изготовление мелющих шаров на станах ПКП было впервые опробовано только в 1983 г. в ГДР [50]. Опробование проводилось на станах с плоским инструментом модели UWQ; в настоящее время оборудование для прокатки мелющих шаров на станах ПКП с плоским инструментом производится белорусскими фирмами «Белтехнология и М» и «АМТ-Инжиниринг» [51] – таблица 1.3.

Необходимо отметить, что станы ПКП с плоским инструментом имеют ряд существенных недостатков, к основным из которых можно отнести низкую производительность и значительную величину отходов металла в виде концевой обрезки, составляющей 5-14%. Данные недостатки связаны с ограничением числа ходов при возвратно-поступательном движении плит и невозможностью прокатки заготовок исходной длиной более 6 м, обусловленной отсутствием механизмов подачи и удерживания заготовок на оси прокатки.

Таблица 1.3 – Характеристики станов поперечно-клиновой прокатки шаров

Наименование параметра	Значение параметра для моделей стана ПКП			
	UWQ40.1×400	UWQ100.1×630	SP 3400-2-ИН (Белтехнология-М)	WRL100 TN (АМТ- Инжиниринг)
Ширина инструмента, мм	520	800	550	500
Диаметр шаров, мм	20	120	40-80	50-100
Максимальное число двойных ходов в мин.	6,7	2,5	6	7,5
Мощность двигателя, кВт	90	170	200	120

По мнению авторов работы [50] перспективным направлением является производство мелющих шаров на станах ПКП не с плоским инструментом, а на таких станах валкового типа, но после их модернизации. Проведенным анализом и расчетами авторами показано, что за счет модернизации валковых станов ПКП, направленной на реализацию возможности прокатки заготовок длиной до 6 м в винтовых калибрах, возможно добиться увеличения производительности стана в 5-10 раз и снижения величины технологических отходов в 4-6 раз.

В целом, несмотря на разработку новых конструкционных и технологических решений по производству мелющих шаров на станах ПКП, позволяющих значительно повысить технико-экономические показатели такого производства, применение станов ПКП остается оправданным только при условии незначительных объемов выпуска готовой продукции.

### **1.3 Направления и результаты совершенствования химического состава и режимов термомеханической обработки мелющих шаров**

В течение значительного временного периода в отечественной металлургии превалировало производство мелющих шаров из отбраковки, то есть из стали иного назначения несоответствующего качества. Так, например, шаропрокатные станы на Кузнецком, Нижнетагильском металлургических комбинатах,

Днепровском металлургическом комбинатах и комбинате «Азовсталь», запущенные в эксплуатацию в 60-ых гг. XX века изначально строились для переработки отбраковки рельсовой стали. Данная ситуация коренным образом изменилась в связи со значительным повышением требований потребителей к качеству мелющих шаров, что, в конечном итоге нашло отражение и в изменении нормативной документации на производство данного вида продукции. Так, если в ГОСТ 7254-89 имелось 4 группы твердости шаров, из которых в первых трех регламентировалась только поверхностная твердость, а в четвертой – дополнительно твердость на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса шара, то в новой редакции данного ГОСТ от 2015 г. появились шары 5-ой группы – шары высокой твердости поверхности с нормированной объемной твердостью. Также в редакции ГОСТ 7524 от 2015 г. в отличие от ГОСТ 7525-89 появился пункт о контроле ударостойкости шаров 4-ой и 5-ой групп твердости, производимом по согласованию между изготовителем и потребителем и по методике изготовителя.

С учетом повышения требований к параметрам качества и основным характеристикам мелющих шаров примерно с 10-ых годов XXI века в отечественной металлургии активное развитие получило направление по разработке специализированных сталей для производства мелющих шаров, регламентированных внутренними нормативными документами (например, СТО 899-36-2012 в АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ТУ 1171-078-00186223-2016 в ОАО «Гурьевский металлургический завод»). В соответствии с указанными нормативными документами для производства шаров первых трех групп твердости по ГОСТ 7524-2015 (с контролем только поверхностной твердости) используются средне- и высокоуглеродистые стали (содержание углерода 0,6-0,8%), легированные только марганцем (на уровне 0,6-0,8%), а мелющие шары 4-ой и 5-ой групп твердости (высокой твердости поверхности с нормированной твердостью на глубине 0,5 радиуса шара и нормированной объемной твердостью соответственно) изготавливают из сталей с аналогичным содержанием углерода, но несколько большим (до 0,9%) содержанием марганца и легированных в дополнение к марганцу хромом (0,30-0,75%) и в ряде случаев никелем (0,3-0,5%) и

титаном (0,02-0,05%).

Как указано выше для производства шаров 5-ой группы твердости на различных предприятиях успешно применяются стандартные марки высокоуглеродистых [6, 52], инструментальных и рессорно-пружинных [5] сталей, а также стали, разработанные на основе указанных стандартных марок [4]. При этом имеется целый ряд исследований отечественных авторов по разработке оптимального химического состава сталей для производства мелющих шаров данной группы твердости, обладающих при этом повышенной ударо- и износостойкостью [11, 12, 14, 53-56]. Так в работе [14] обосновывается эффективность производства мелющих шаров из хромомолибденовой стали условной марки ШХМ. На основании опытно-промышленных экспериментов, проведенных в условиях действующего шаропрокатного стана 40-80, определено, что объемная твердость термообработанных шаров из такой стали в среднем составляет 63 HRC. При этом твердость по сечению шара находится в диапазоне 61-67 HRC. Промышленные испытания шаров из стали ШХМ при помоле цемента [53] и измельчении магнетитовых кварцитов [54] показали их значительно меньший удельный расход по сравнению с шарами аналогичного диаметра из рельсовых и углеродистых сталей, что свидетельствует об их повышенной ударо- и износостойкости.

В работах [55, 56] представлены результаты опытного производства мелющих шаров диаметром 35 мм из среднеуглеродистой стали, легированной марганцем в диапазоне 0,9-1,01%, а также хромом на уровне 0,34-0,41% в условиях ПФ ТОО «Кастинг» (Казахстан). Согласно полученных данных поверхностная твердость таких шаров после их термической обработки составляет 59-64 HRC, твердость шаров на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса – 55-60 HRC. Результаты определения внутренних напряжений шаров свидетельствует об их потенциально высокой ударной стойкости.

Авторами работы [11] на основании анализа результатов исследований особенностей структурообразования при производстве мелющих шаров повышенного качества, проведенных различными авторами, разработаны два

варианта легированных заэвтектоидных сталей, применение которых обеспечивает шарам твердость на уровне 62-64 HRC при равномерном ее распределении по объему шара.

В работе [12] авторами в зависимости от диаметра мелющих шаров рекомендуются различные оптимальные диапазоны изменения содержания в стали углерода и таких легирующих элементов, как хром и молибден. При повышении диаметра шаров в диапазоне от 20 до 120 мм увеличивается и рекомендуемое содержание в стали указанных химических элементов, а рекомендуемый интервал изменения содержания кремния и марганца остается неизменным.

Имеется также целый ряд отечественных изобретений [57-59], направленных на повышение эксплуатационных характеристик мелющих шаров за счет совершенствования их химического состава. Содержание углерода, а также состав и концентрация легирующих элементов в предлагаемых сталях варьируется в достаточно широких пределах. Обобщенные данные о химическом составе экспериментальных сталей для производства мелющих шаров с повышенной эксплуатационными характеристиками приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Химический состав отечественных опытных сталей для производства мелющих шаров повышенной твердости, ударо- и износостойкости

Источник	Содержание элементов, %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Ti	Mo	Nb	B	Ca
[14]	0,69	0,56	0,21	0,54				0,26	-	-	-
[55, 56]	0,57-0,62	0,90-1,01	0,27-0,34	0,34-0,41	менее 0,4	-	-	-	-	-	-
[11]	0,9-1,2	0,8-1,5	0,5	1,0-1,7 1,3-1,7	0,40-0,60 -	0,15-0,25	-	- 0,20-0,40	-	-	-
[12]	0,6-0,9	0,7-1,0	0,15-0,40	0,3-1,1	-	-	-	0,05-0,25	-	-	-
[57]	0,65-0,75	0,70-0,80	0,20-0,35	0,40-0,50	0,01-0,03	-	0,005-0,010	0,010-0,025	-	0,001-0,003	-
[58]	0,60-0,78	0,75-0,85	0,20-0,35	0,30-0,60	-	0,03-0,18	-	0,005-0,025	0,001-0,015	-	0,00005-0,0001
[59]	0,65-0,80	0,70-0,90	0,20-0,40	0,30-0,60	0,01-0,03	-	-	0,005-0,020	-	-	0,005-0,040

Имеющиеся в литературе данные о производстве мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости за рубежом [6, 12, 34, 60] также свидетельствуют о широком перечне и интервале варьирования концентраций углерода и легирующих элементов (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Химический состав сталей для производства мелющих шаров повышенной твердости за рубежом

Производитель	Диаметр шаров, мм	Химический состав								Твердость, HRC	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	S		P
									Не более		
«Moly Cor» (Италия) [12]	25-125	0,6-1,0	0,10-0,90	0,40-0,90	0,10-0,60	-	-	0,05-0,20	0,035	0,035	61,5-65,0
Gerdau Ameri-steel (США) [12]	25-90	0,9-1,1	0,25	1,10	0,60	0,4	-	0,15	0,050	0,050	60-62
Litzkuhn & Niederwipper (Германия) [12]	20-125	0,4-1,0	0,15-1,60	0,10	1,80	-	-	0,4-1,5	0,030	0,030	59-65
Vitkovice Cylinderc a.s. (Чехия) [6]	15-150	0,83	0,26	0,70	0,08	0,04	0,005	0,01	0,015	0,008	60-65
Armco (США) [12]	15-100	0,6-1,0	-	0,10-0,60	0,10-0,60	-	-	-	0,035	0,035	64-65
«Moly Cor» (Австралия) [34]	94-105	0,75-0,85	0,10-0,35	0,85-1,35	0,5-1,0	-	-	0,10	0,035	0,035	57-62
	125-140		0,15-0,35	0,75-1,25	0,75-1,25						

В изобретениях зарубежных авторов [61-63] интервал варьирования химического состава предлагаемых сталей для производства мелющих шаров еще более широк (таблица 1.6).

Анализируя тенденции изменения химического состава стали для производства мелющих шаров, необходимо отметить, что, несмотря на значительное увеличение доли производства данного вида продукции из специализированных сталей, по-прежнему имеет место производство мелющих шаров из отбраковки рельсов. При этом такой способ переработки отбракованных рельсов применяется, как в России [9], так и за рубежом [64, 65].

Таблица 1.6 – Химический состав зарубежных опытных сталей для производства мелющих шаров с повышенными эксплуатационными характеристиками

Источник	Содержание элементов, %												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	Ti	Al	Nb	N	B	Ca
[61]	0,35-0,7	0,1-1,5	0,1-0,8	-	-	До 0,03	-	До 0,05	До 0,005	До 0,1	До 0,02	До 0,005	До 0,0005
[62]*	0,3-0,6	0,6-2,0	0,01-1,0	-	-	-	-	-	0,005-0,010	-	0,003-0,02	-	-
[63]	0,3-1,1	0,5-2,0	0,1-1,8	0,1-1,5	0,1-1,0	-	0,05-0,5	-	0,05-0,1	-	0,005-0,03	0,005-0,05	-

\* дополнительно один или более элементов группы Pb, Bi, Te, Ca, In до содержания не более 0,015%

Переходя к анализу технологии и режимов термомеханической обработки мелющих шаров, необходимо отметить, что они находятся в тесной взаимосвязи с марочным сортаментом стали для производства шаров. В целом в зависимости от варианта реализации процесс термомеханической обработки мелющих шаров можно условно разбить на четыре, либо пять основных стадий (рисунок 1.7). При реализации наиболее распространенной схемы термомеханической обработки (рисунок 1.7 а) производится горячая прокатка шаров, после чего они охлаждаются до температуры закалки, далее происходит непосредственно их закалка, и затем отпуск. Более сложная схема подразумевает проведение закалки с отдельного нагрева (рисунок 1.7 б).

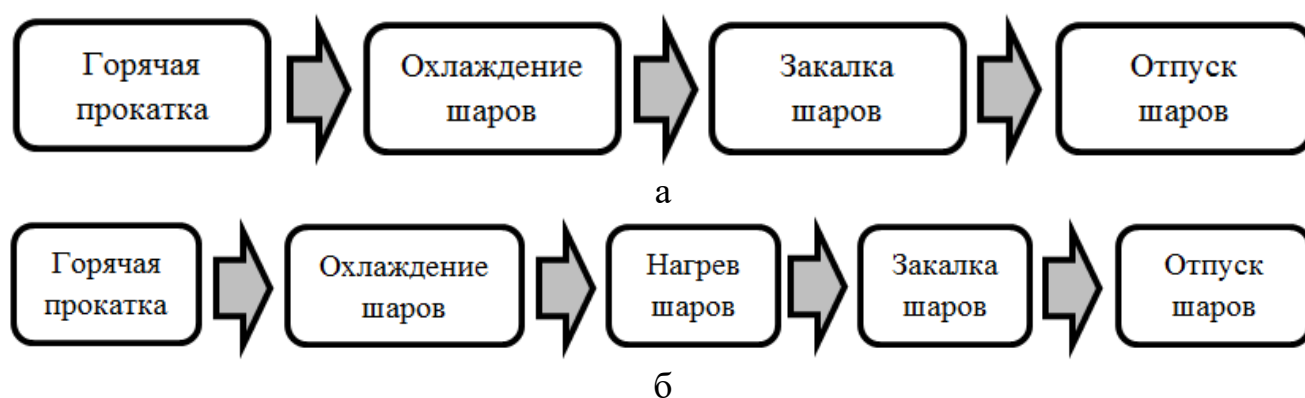


Рисунок 1.7 – Схемы термомеханической обработки мелющих шаров с использованием закалки с прокатного (а) и отдельного (б) нагрева

Выбор температуры прокатки шаров производится исходя из наличия разнонаправленного влияния данного параметра на пластичность стали в процессе деформации и на производительность прокатного стана. С одной стороны согласно общепринятым закономерностям [66-68], подтвержденным многочисленными экспериментальными исследованиями [69-80], повышение температуры прокатки (до верхнего предела оптимального интервала для конкретной марки стали) приводит к увеличению пластичности сталей, что снижает энергосиловые параметры прокатки. Как следствие при этом происходит уменьшение удельного расхода электроэнергии и прокатных валков, что влияет на уменьшение себестоимости проката. Также повышение пластичности стали снижает вероятность образования дефектов при прокатке, то есть повышает качество шаров. С другой стороны увеличение температуры прокатки обуславливает увеличение времени охлаждения шаров до температуры закалки, что закономерно приводит к снижению производительности шаропрокатного стана.

Говоря о влиянии температуры прокатки на качество шаров необходимо также учитывать влияние данного параметра на вероятность формирования внутренних дефектов в виде рыхлости. Исходя из особенностей течения металла при поперечной прокатке, реализуемой, в том числе и при прокатке мелющих шаров, вероятность «разрыхления» металла в осевой зоне формируемого профиля может повышаться с ростом температуры деформации, тогда как при продольной прокатке имеет место обратная картина – повышение температуры прокатки способствует уменьшению склонности к «разрыхлению» металла. Однако при этом необходимо отметить, что вероятность образования «рыхлости» в осевой зоне шаров при увеличении температуры их поперечно-винтовой прокатки фактически реализуется только в случае переполнения калибра, либо, например, при затрудненном течении металла в осевом направлении [81]. При таких отклонениях от оптимального технологического режима возможно вскрытие внутренней полости в деформируемых заготовках при температурах прокатки шаров порядка 950-1050°C [81].

Исходя из вышесказанного, в условиях каждого конкретного шаропрокатного стана придерживаются оптимального температурного интервала нагрева заготовок под прокатку, установленного, чаще всего, опытным путем с учетом остывания заготовок при движении от нагревательной печи к прокатной клетки. Так, авторами работы [82] по результатам анализа технологии производства мелющих шаров диаметром 80 мм и 100 мм, имеющей место на шаропрокатном стане ШПС-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на момент проведения исследований, даны технологические рекомендации о необходимости сужения температурного интервала нагрева заготовок под прокатку с 965-1070°С до 950-1000°С. Основными задачами данного изменения в технологии нагрева заготовок под прокатку являются снижение перепада твердости по объему шаров и уменьшение вероятности формирования рыхлости в их осевой зоне [82].

Возвращаясь к снижению производительности шаропрокатных станов при повышении температуры прокатки шаров, можно отметить, что указанные потери могут быть компенсированы за счет применения специальных подстуживающих устройств, установленных между прокатной клетью и закалочным устройством в особенности, если они оборудованы системой для дополнительной подачи охлаждающего реагента. В качестве примера реализации подобного подхода можно привести шаропрокатный стан 30-60, введенный в эксплуатацию в ПАО «Северсталь» в 2017 г. На данном стане конструкции фирмы «Wisдри» (Китай) имеется подстуживающее устройство барабанного типа, оборудованное коллектором для подачи сжатого воздуха [33].

Необходимо констатировать, что подстуживающие устройства на шаропрокатных станах применяются не только и не столько с целью увеличения их производительности, а, прежде всего для повышения показателей качества мелющих шаров. Охлаждение шаров в таких устройствах позволяет в отличие от охлаждения на конвейере обеспечить точно заданную температуру шара к моменту его закалки, добиться выравнивания температуры в объеме шара, что в совокупности обеспечивает высокую и равномерную твердость по сечению шаров, обуславливает возможность организации стабильного производства

мелющих шаров с нормированной объемной твердостью.

Применение дополнительного нагрева шаров перед их подачей в закалочное устройство (рисунок 1.7 б) позволяет решать те же основные задачи, что и подстуживающее устройство, при этом гарантированно обеспечивая стабильность и равномерность распределения температуры в объеме шаров на момент их закалки.

Закалка является основной операцией термомеханической обработки мелющих шаров, обеспечивающей их заданную твердость. Анализ литературных данных показывает, что на современных прокатных станах при производстве шаров повышенной твердости и ударной стойкости успешно применяются варианты, как одностадийной закалки, так и закалки, включающей две и более стадий. В частности одностадийная закалка в барабане реализуется на новом шаропрокатном стане, запущенном в эксплуатацию в 2017 г. в АО «ЕВРАЗ НТМК» [4, 83], а на новых шаропрокатных станах ПАО «Северсталь», введенных в работу эксплуатации в 2014 г. и 2017 г. используется технология прерванной закалки [33]. На Гурьевском металлургическом заводе (в настоящее время ООО «Гурьевск-Сталь») для различных марок сталей применяют, как одностадийную, так и двухстадийную закалку [84]. В работе [85] на основании комплекса экспериментальных исследований показана эффективность применения технологии «Q&P» термической обработки для производства шаров большого диаметра (100 мм) с повышенной объемной твердостью и ударной стойкостью. Технология «Q&P» («Quenching and Partitioning», в переводе – «закалка и перераспределение») заключается в приостановке процесса закалки при достижении температуры, лежащей в интервале между точками  $M_H$  и  $M_K$ , выдержке при данной температуре и последующем нагреве до температуры, достаточной для диффузии углерода [86]. Данная технология термической обработки в последние годы находит применение за рубежом [87-91], в том числе и для сталей, химический состав которых близок к сталям для производства мелющих шаров [89].

Завершающей стадией термомеханической обработки мелющих шаров

является их отпуск, проводимый с целью снятия закалочных напряжений. Проведение отпуска мелющих шаров приводит к незначительному снижению их твердости, однако при этом значительно повышается их устойчивость к ударным нагрузкам. Наиболее простым в реализации является самоотпуск шаров, то есть охлаждение шаров в специальных бункерах или контейнерах. В этом случае существенное значение имеют такие параметры самоотпуска шаров, как температура загрузки их в бункеры (контейнеры) и температура выгрузки шаров после самоотпуска, а также продолжительность выдержки шаров в таких бункерах, так как при несоблюдении оптимальных параметров самоотпуска резко возрастает вероятность их растрескивания еще до поставки потребителю [92-94].

Анализ показывает, что рекомендации по оптимальным параметрам самоотпуска по данным различных авторов разнятся в достаточно широких пределах. Так в работе [92] применительно к шарам диаметром 40 мм рекомендуемая температура шаров перед загрузкой в контейнеры для самоотпуска составляет 190-210°C, время выдержки в таких контейнерах – не менее 24 ч, а температура выдачи из контейнеров – не менее 60°C. По данным работы [93] рекомендуемый нижний предел температуры самоотпуска шаров составляет 60°C для шаров диаметром 30 мм, 140°C – для шаров диаметром 50-60 мм и 180°C – применительно к шарам диаметром 80-100 мм; при этом рекомендуемое время самоотпуска составляет не менее 12 ч, а температура выгрузки шаров из контейнеров – не более 100°C. Авторами исследования [94] установлено, что для шаров диаметром 120 мм начальная температура самоотпуска шаров должна составлять 280-320°C, а длительность самоотпуска шаров – не менее 48 ч при скорости их остывания в бункерах не более 5°C в час. В работе [60] содержатся рекомендации для шаров диаметром 20, 30, 40 и 60 мм, согласно которым температуру начала самоотпуска необходимо поддерживать в пределах не менее 250°C при длительности самоотпуска не менее 12 ч.

Общепризнано, что применение технологии самоотпуска шаров вне зависимости от применяемых режимов является менее эффективным с точки зрения обеспечения высокой ударостойкости шаров по сравнению с их низким

отпуском в специальных печах. В зависимости от марочного сортамента и диаметра шаров температура низкого отпуска может составлять от 160°C до 300°C, а время выдержки в отпускных печах – от 2 до 10 ч [4, 6, 84, 95].

Рядом авторов [11, 96] обосновывается эффективность применения технологии термоциклирования – многократном повторении процессов закалки и самоотпуска – для получения шаров с высокой объемной твердостью.

В целом анализ результатов многочисленных отечественных и зарубежных исследований [4-8, 11-14, 60, 84, 97-103] свидетельствует о значительном многообразии применяемых и рекомендуемых режимов термической обработки мелющих шаров, обеспечивающих их высокую объемную твердость, ударо- и износостойкость. При этом, однако, такие шары в большинстве случаев изготавливают из сталей, легированных в дополнение к марганцу дорогостоящими химическими элементами: хром, никель, молибден. Поэтому важной задачей с точки зрения реализации ресурсосберегающего подхода к производству высококачественных мелющих шаров с повышенными эксплуатационными характеристиками является разработка технологии получения таких шаров из экономнолегированных сталей.

#### **1.4 Анализ опыта применения математического моделирования для совершенствования технологии производства мелющих шаров**

В последние годы, как в России [5, 34, 95, 108-115], так и за рубежом [104, 107, 116-118] значительное распространение получили исследования процессов прокатки и термической обработки мелющих шаров с использованием прикладных программных комплексов, в основу которых положен метод конечных элементов: «DEFORM», «ANSYS», «Q-Form», «Super Form», и т.д. Результаты таких исследований позволяют определить или подтвердить закономерности течения металла, распределения напряжений и деформаций в объеме шара при поперечно-винтовой прокатке, а также распределения температурных полей по объему шаров в процессе их термомеханической

обработки. В конечном итоге полученные закономерности являются базой для разработки и совершенствования режимов прокатки и термической обработки мелющих шаров с целью повышения показателей их качества. Ниже представлен обзор результатов таких исследований.

Исследователями из КНР на основании моделирования в программном комплексе ANSYS установлено, что при поперечно-винтовой прокатке шаров течение металла происходит в двух противоположных направлениях – в калибр и обратно в заготовку; при этом объем металла, поступающий в шар равен объему металла, поступающего в заготовку [104]. Практическое применение установленных закономерностей течения металла заключается в том, что они являются обоснованием необходимости развалки калибра в начальных заходах для выполнения условия по его дальнейшему полному заполнению [105]. Необходимо отметить, что целесообразность развалки калибров была определена А.И. Целиковым с соавторами [37] задолго до проведения работы исследователями из КНР. То есть, по сути, авторы статьи [104] обосновали выводы, ранее сформулированные другими исследователями эмпирически. Практическое использование подтвержденных закономерностей течения металла при поперечно-винтовой прокатке шаров заключается в учете наличия растягивающих напряжений в осевой части заготовки при проектировании конкретных режимов прокатки. В случае превышения растягивающими напряжениями критической величины в центральной зоне шаров происходит образование пустот («эффект Маннесмана» [106]), что является недопустимым.

Польскими исследователями с применением программного обеспечения «Simufact.Formingv.12 simulation» проведено моделирование винтовой прокатки шаров при использовании 4-х заходных валков [107]. По результатам указанного моделирования авторами сформулированы закономерности влияния количества заходов на эффективность прокатки и закономерности изменения нагрузок и крутящего момента во время многозаходной прокатки.

В работе [108] представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке мелющих шаров диаметром

60 мм из рельсовой стали марки К76Ф в условиях Гурьевского металлургического завода, выполненные в программном комплексе DEFORM-2D. Полученные авторами данные о распределении критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению мелющих шаров позволили обосновать оптимальный температурный режим их прокатки, внедрение которого обусловило повышение ударной стойкости производимых мелющих шаров.

В рамках исследования [109] в программах QForm-3D и DEFORM-3D проведено моделирование прокатки шаров диаметрами 93 и 125 мм в винтовых калибрах по рассчитанной авторами калибровке. Обработка полученных данных позволила установить закономерности распределения интенсивности напряжений в объеме и по сечению шаров, определить величину и характер напряжений. По результатам моделирования установлено, что применение предложенного режима прокатки позволяет гарантированно получать шары с отсутствием дефектов в их сердцевине (рыхлости металла, внутренних полостей), что подтверждено результатами промышленного эксперимента.

Исследователями Уральского федерального университета совместно со специалистами АО «ЕВРАЗ НТМК» с использованием программного комплекса «Deform Integrated 2-D, 3-DV2019» проведено моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки мелющих шаров на валках с непрерывно изменяющимся шагом [110]. Исследованы напряжения и деформации, возникающие при прокатке шаров, процессы захвата заготовки в начальный момент прокатки и отделения концевой обрести. При этом достоверность результатов моделирования подтверждена результатами опытной прокатки шаров на действующем шаропрокатном стане АО «ЕВРАЗ НТМК».

Этими же авторами применительно к условиям шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» проведено моделирование распределения температурных полей по сечению шара в моменты окончания прокатки и после охлаждения на конвейере перед закалкой [94]. По полученным данным на выходе из прокатной клетки обнаруживается существенная неравномерность температуры поверхности шара, составляющая до 60°C. Установлено, что имеет место прирост температуры

от 880°C на пояске до 940°C на полюсах, При этом повышенная температура выявлена в области внедрения реборды валка в заготовку, то есть в зоне значительных деформаций. Определено, что после охлаждения на конвейере температура поверхности шара существенно выравнивается. В продолжении указанных исследований в программном комплексе DEFORM-3D проведено моделирование изменения температуры в объеме шара в процессе его охлаждения перед закалкой на установке выравнивания температуры [5]. Применительно к шарам диаметром 120 мм с температурой окончания прокатки 1050°C показано, что охлаждение в течение 5 мин. обеспечивает подачу шаров на закалку с оптимальной температурой поверхности и осевой зоне.

Результаты вышеприведенных исследований [5, 54, 110], а также дополнительных исследований представленных в диссертационной работе В.Ю. Рубцова [111], явились базой для разработки новых калибровок шаропрокатных валков и режимов прокатки мелющих шаров, эффективность применения которых подтверждена результатами их опытно-промышленного опробования и внедрения в АО «ЕВРАЗ НТМК».

Другой группой исследователей Уральского федерального университета и специалистов АО «ЕВРАЗ НТМК» в прикладном программном комплексе «Deform V12.1» проведено моделирование процесса двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм на шаропрокатном стане АО «ЕВРАЗ НТМК» [112]. Полученные данные о распределении интенсивности деформаций и точечных напряжений позволили выявить недостатки существующей калибровки, обосновать направления ее совершенствования и в конечном итоге разработать усовершенствованную двухзаходную калибровку валков с непрерывно меняющимся шагом для прокатки мелющих шаров [113]. Проведенное моделирование прокатки мелющих шаров с использованием новой калибровки валков позволило выявить существенное снижение напряжений по всему объему деформируемой заготовки, что способствует снижению износа калибров прокатных валков [114]. Помимо исследований закономерностей прокатки мелющих шаров с использованием компьютерного моделирования также

определены закономерности влияния химического состава стали на ее фазовый состав и прочность мелющих шаров после их термической обработки [115]. Практическая значимость исследований [112-115], которые вошли составной частью в диссертационную работу И.К. Галимьянова [34], подтверждена результатами внедрения эффективных режимов производства мелющих шаров 5-й группы твердости в АО «ЕВРАЗ НТМК».

В целом можно констатировать, что моделирование процессов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров с использованием существующих стандартных программных комплексов, основанных на применении методов конечных элементов, является эффективным инструментом для совершенствования технологии производства мелющих шаров повышенного качества. При этом результаты таких исследований нуждаются в обязательной проверке их адекватности в производственных условиях, либо, по крайней мере, на первом этапе – в проверке с использованием лабораторных экспериментов по физическому моделированию процессов производства мелющих шаров. Также необходимо учитывать ограниченность области применения стандартных программных комплексов в части марочного сортамента производимых мелющих шаров. Во-первых, это связано с тем, что в базах данных таких программ содержатся основные физические характеристики (пластические и деформационные свойства, фазовый состав и т.д.) ограниченного числа стандартных марок стали. По этой причине для получения адекватных результатов моделирования процессов прокатки и термической обработки мелющих шаров из сталей экспериментального химического состава необходимо вначале определить указанные характеристики экспериментальным путем. Во-вторых, моделирование процессов производства мелющих шаров в прикладных программных комплексах не учитывает, либо учитывает в крайне ограниченном объеме неоднородность структуры и химического состава исходных заготовок, их температурную неоднородность, неравномерность воздействия технологических факторов в процессе производства шаров. В результате закономерно снижается адекватность результатов моделирования и эффективность их использования при

совершенствовании режимов производства мелющих шаров. Решением данной проблемы является ввод поправочных коэффициентов в процессе самого моделирования, либо для готовых результатов моделирования. Однако величины таких коэффициентов также могут быть получены только путем дополнительных экспериментальных исследований.

### **1.5 Выводы и постановка задач исследования**

Аналитический обзор литературных и производственных данных по тематике, связанной с повышением качества и эксплуатационных характеристик мелющих шаров за счет совершенствования технологии их производства, позволил сделать следующие основные выводы:

1) на текущий момент в отечественной металлургии практически завершен переход от концепции применения шаропрокатных станков, как агрегатов для переработки заготовок несоответствующего качества различного химического состава к концепции шаропрокатных станков, как самостоятельных производств высококорентабельной продукции ответственного назначения;

2) вышеуказанная трансформация подходов к производству мелющих шаров, обусловленная повышением требованием потребителей к их качеству, привела к существенным изменениям состава оборудования, внедрению новых технологических решений на шаропрокатных станах; среди таких изменений можно выделить: внедрение индукционных печей для повышения стабильности и качества нагрева заготовок под прокатку, совершенствование калибровки валков клеток поперечно-винтовой прокатки, установку дополнительных специализированных агрегатов для стабилизации температурных режимов обработки шаров и организации их многоступенчатой термической обработки;

3) на сегодняшний день одним из основных направлений повышения показателей качества и характеристик катаных мелющих шаров, как в отечественной, так и в мировой металлургии, является совершенствование их химического состава; при этом среди исследователей и производителей мелющих

шаров отсутствует единый подход к оптимизации химического состава сталей для производства мелющих шаров, о чем свидетельствует значительное многообразие применяемых и рекомендуемых марок стали;

4) опыт промышленного производства мелющих шаров свидетельствует о возможности получения шаров высокой поверхностной и объемной твердости из широкого перечня легированных марок стали при использовании оптимального режима их термической обработки; при этом имеет место проблема обеспечения высокой ударной стойкости таких шаров, а также проблема повышенной себестоимости производства, что свидетельствует в пользу развития направлению по применению экономнолегированных сталей;

5) моделирование процессов прокатки и термической обработки мелющих шаров с применением стандартных прикладных программных комплексов («DEFORM», «ANSYS», «Q-Form», «Super Form») является эффективным методом обоснования направлений совершенствования технологических режимов производства мелющих шаров и конкретных оптимальных параметров указанных режимов; при этом необходимым условием получения результатов, адекватных реальному производству, является проведение предварительных экспериментальных лабораторных и промышленных исследований.

На основании обобщения вышеприведенных результатов аналитического исследования сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Цель: Теоретическое обоснование и разработка ресурсосберегающих технологических режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров, обеспечивающих одновременное повышение их объемной твердости и ударостойкости.

Задачи работы:

1) провести исследования влияния химического состава и режимов прокатки мелющих шаров на показатели их твердости и ударной стойкости;

2) выполнить моделирование напряженного состояния металла и распределения температурных полей в объеме мелющих шаров при различных условиях их прокатки;

3) выполнить аналитические исследования влияния температурных параметров прокатки мелющих шаров на удельные расходы энергоресурсов, материалов и отбраковку мелющих шаров;

4) разработать энерго- и металлосберегающие режимы прокатки мелющих шаров высокой поверхностной твердости и устойчивости к ударным нагрузкам;

5) обосновать химический состав экспериментальных сталей для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и выполнить исследования структуры и свойств таких сталей на различных технологических стадиях производственного цикла;

6) провести исследования сопротивления деформации сталей экспериментального химического состава при варьировании термомеханических параметров их прокатки;

7) разработать режимы прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров из экономнолегированной стали, обеспечивающие производство мелющих шаров высокой поверхностной и объемной твердости, одновременно обладающих повышенной ударной стойкостью.

## 2 Исследование и разработка энерго- и металлосберегающих режимов производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости

### 2.1 Исходные условия и обоснование направлений проведения исследований

Исследования проводили применительно к условиям действующего шаропрокатного стана 40-100. Сортамент стана включает в себя шары, производимые по 2, 3 и 4 группам твердости согласно требований ГОСТ 7524-2015. Химический состав используемых сталей различается в зависимости от диаметра шара и группы твердости (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Химический состав сталей для производства мелющих шаров

Марка стали	Группа твердости	Диаметр шара, мм	Содержание химических элементов, %							
			C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P
Ш2.1	2, 3	40-60	0,60-0,69	0,60-0,70	0,20-0,30	-	-	-	0,025	0,030
Ш2.2	2, 3	70-100	0,70-0,80	0,60-0,70	0,20-0,30	-	-	-	0,015	0,020
Ш2.3	4	40-60	0,65-0,75	0,70-0,80	0,20-0,35	0,30-0,40	0,30	0,30	0,020	0,030
Ш2.4	4	70	0,65-0,75	0,70-0,80	0,20-0,35	0,35-0,45	0,30	0,30	0,020	0,030
Ш2Л	4	80-100	0,65-0,75	0,70-0,80	0,20-0,35	0,50-0,60	0,30	0,30	0,015	0,020

Производство мелющих шаров на указанном стане включает в себя следующие основные технологические стадии: нагрев заготовок, прокатку, подстуживание шаров на конвейере с последующей их закалкой в шнековом барабане и самоотпуском в бункерах. Регламентированы следующие основные параметры технологии: температура в нагревательной печи и продолжительность нагрева заготовок, температура заготовок на выдаче из печи, длительность

охлаждения прокатанных шаров на конвейере перед закалкой, температура шаров перед закалкой, длительность охлаждения шаров в закалочном устройстве, температура охлаждающей воды, температура и длительность самоотпуска шаров. Диапазон допустимых изменений указанных технологических параметров не зависит от марки стали и, соответственно, от группы твердости, но для большинства параметров определяется диаметром производимых шаров (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Параметры технологии производства мелющих шаров

Диаметр шара, мм	Время нагрева заготовок, не менее, мин.	Температура выдачи заготовок из нагревательной печи, °С	Время подстуживания шаров перед закалкой, с	Время охлаждения в закалочном барабане, с
40	20	880-950	65-70	35-40
50	25	880-950	75-85	40-45
60	25	880-1000	95-100	45-55
70	30	880-1000	95-100	58-63
80	30	950-1050	100-105	65-75
90	40	950-1050	105-110	78-83
100	40	950-1050	110-115	85-90

Для ряда других параметров допустимый диапазон их изменения является неизменным для всего сортамента шаров. В частности температура шаров перед закалкой установлена в пределах  $830\pm 30^{\circ}\text{C}$ , температура охлаждающей воды – не более  $40^{\circ}\text{C}$ , температура самоотпуска шаров – не менее  $180^{\circ}\text{C}$ , длительность самоотпуска – не менее 12 ч.

Анализ показателей рассматриваемого стана свидетельствует о значительной доле продукции несоответствующего качества, полученной, как по причине несоответствия твердости нормативным значениям, так и по причине неудовлетворительных результатов испытаний шаров на уданую стойкость (таблица 2.3). При этом наибольшая удельная отбраковка имеет место при производстве шаров диаметром 60 мм, в особенности 4-й группы твердости.

Таблица 2.3 – Отбраковка мелющих шаров

Диаметр шаров, мм	Отбраковка шаров по причинам и группам твердости, %					
	пониженная твердость			неудовлетворительные испытания на ударную стойкость		
	2 группа	3 группа	4 группа	2 группа	3 группа	4 группа
40	-	0,36	0,85	0,43	1,52	1,45
50	-	0,64	1,38	0,58	1,44	2,11
60	0,15	0,52	1,67	1,12	2,78	3,54
70	0,24	0,41	1,55	0,93	2,02	3,02
80	-	0,28	1,39	0,46	1,85	2,77
90	0,22	0,43	1,54	0,67	1,97	2,95
100	-	0,35	1,60	1,33	1,14	3,18

Предварительный анализ представленных выше данных (таблица 2.2) позволяет выделить в качестве параметра, оказывающего существенное влияние на потенциальную нестабильность регламентированных свойств готовых шаров (твердость, ударостойкость) и, соответственно на высокую величину отбраковки по несоответствию нормативным значениям указанных свойств, избыточно широкого диапазона температуры прокатки, в особенности для шаров диаметром 60 мм и более. Так для шаров диаметром 60 мм и 70 мм указанный диапазон составляет 120°C, а для шаров диаметром 80-100 мм – 100°C. При этом температурный интервал, которому должны соответствовать шары перед закалкой составляет только 60°C, а возможность регулирования температуры шаров под закалку за счет варьирования продолжительности их подстуживания на конвейере ограничена в узких пределах (диапазон изменения составляет всего 5 секунд) – таблица 2.2. В результате, в особенности с учетом нормативной погрешности используемых стационарного прибора для измерения температуры заготовок в потоке стане (погрешность  $\pm 7,5\%$  от измеряемого значения), имеет место высокая вероятность отклонений от оптимальной температуры закалки, что закономерно обуславливает формирование дефектной микроструктуры, снижение твердости и ударной стойкости шаров.

Таким образом, для условий рассматриваемого стана потенциально эффективным направлением повышения свойств мелющих шаров является

оптимизация температурных режимов их прокатки. В пользу выбора указанного направления совершенствования технологии производства мелющих шаров также свидетельствует значительное исчерпание ресурса улучшения регламентируемых характеристик мелющих шаров за счет повышения их металлургического качества. На основании ранее проведенных и значительных по объему исследований, результаты которых отражены в диссертации И.С. Морозова [119], разработаны усовершенствованные режимы производства шаровых сталей, позволившие значительно снизить отбраковку шаров при испытаниях на ударную стойкость за счет снижения количества дефектов микроструктуры литых заготовок, переходящих в готовые шары.

Необходимо отметить, что совершенствование температурных режимов прокатки мелющих шаров с учетом их влияния на температуру последующей закалки неразрывно связано с химическим составом применяемых сталей – оптимальный температурный интервал закалки определяется температурой фазового превращения, которая, в свою очередь, напрямую зависит от химического состава стали. С учетом допустимого интервала изменения основных химических элементов в рассматриваемых сталях (таблица 2.2) температура фазового превращения для конкретной марки стали может изменяться на величину от 15°C до 20°C (таблица 2.4).

В соответствии с указанным обоснованием, а также принимая во внимание значительное влияние содержания основных химических элементов в стали на ее прочностные и пластические характеристики, как в исходном состоянии, так и после закалки, в качестве дополнительного направления повышения твердости и ударной стойкости мелющих шаров выбрано совершенствование химического состава применяемых сталей.

При оптимизации температурного режима прокатки мелющих шаров необходимо учитывать, что температура прокатки шаров оказывает значимое влияние не только на формирование качества их структуры (с учетом закалки с прокатного нагрева), но и на напряженное состояние металла в процессе деформации, то есть на вероятность образования дефектов в процессе прокатки.

Таблица 2.4 – Расчетные значения температуры фазового превращения для шаровых сталей\*

Марка стали	Содержание химических элементов, %						Температура фазового превращения, °С
	С	Mn	Si	Cr	S**	P**	
Ш2.1	0,60	0,60	0,30	-	0,020	0,025	770
	0,69	0,70	0,20	-	0,020	0,025	753
Ш2.2	0,70	0,60	0,30	-	0,010	0,015	751
	0,80	0,70	0,20	-	0,010	0,015	736
Ш2.3	0,65	0,70	0,35	0,30	0,015	0,025	764
	0,75	0,80	0,20	0,40	0,015	0,025	746
Ш2.4	0,65	0,70	0,35	0,35	0,015	0,025	759
	0,75	0,80	0,20	0,45	0,015	0,025	742
Ш2Л	0,65	0,70	0,35	0,50	0,010	0,015	756
	0,75	0,80	0,20	0,60	0,010	0,015	739

\* расчеты проведены по методике [120] для вариантов минимального и максимального содержания основных химических элементов в сталях с учетом характера их влияния на температуру фазового превращения (повышение содержания С, Mn и Cr в стали снижают температуру фазового превращения, а повышение содержания Si – снижает данную температуру);

\*\* содержание серы и фосфора приняты стабильными на уровне ниже допустимого предела на 0,005% для всех марок стали.

Кроме того, изменение температуры прокатки закономерно приводит к изменению сопротивления стали пластической деформации, что, в свою очередь, значительно влияет на усилие прокатки, нагрузку на оборудование шаропрокатного стана, а, следовательно, на удельный расход электроэнергии, интенсивность износа калибров прокатных валков. Также необходимо учитывать необходимую корректировку режимов работы нагревательных печей и показателей их работы, в том числе продолжительности нагрева, расхода топлива на нагрев. Таким образом, совершенствование температурных режимов прокатки мелющих шаров неразрывно связано с вопросами энерго- и материалосбережения. Поэтому наряду с направлением повышения качества и характеристик мелющих шаров также рассмотрено направление, связанное с повышением энергоэффективности и снижением расхода материалов на их производство.

В качестве основного объекта исследований по всем вышеприведенным направлениям выбраны мелющие шары диаметром 60 мм, производимые по 4-й

группе твердости, так как при производстве таких шаров имеет место наибольшая удельная отбраковка (таблица 2.3), а также с учетом наибольшей доли шаров диаметра 60 мм в общем сортаменте рассматриваемого стана.

## **2.2 Исследования влияния химического состава и температурного режима прокатки мелющих шаров на показатели их качества**

Комплекс исследований, направленных на обоснование направлений оптимизации химического состава и температурных режимов прокатки мелющих шаров, включал в себя три этапа. На первом этапе проведен статистический анализ влияния параметров производства мелющих шаров на их твердость и ударную стойкость, на втором этапе – компьютерное моделирование динамики температуры мелющих шаров в процессе их прокатки и охлаждения перед закалкой; на третьем этапе – металлографические и дюрOMETрические исследования мелющих шаров текущего производства.

Статистические исследования проводили с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа. В качестве параметров оптимизации использовали поверхностную твердость мелющих шаров, твердость мелющих шаров на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса и долю шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость. Анализировали влияние на указанные параметры оптимизации следующих факторов: содержание в стали основных и примесных химических элементов (C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, S, P), длительность нагрева заготовок под прокатку, температура выдачи заготовок из нагревательной печи. Последний параметр выступает в качестве характеристики температуры прокатки шаров, так как напрямую температура прокатки в потоке производства не фиксируется. Диапазон изменения анализируемых факторов представлен в таблице 2.5.

Результаты регрессионного анализа свидетельствуют, что на повышение твердости мелющих шаров, как поверхностной, так и на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса шара, значимое влияние оказывает увеличение содержания углерода, марганца и хрома

в стали, а также повышение температуры прокатки шаров:

$$HB_{\text{пов}} = 3,35 + 18,6 \cdot [C] + 11,2 \cdot [Mn] + 17,4 \cdot [Cr] + 0,025 \cdot t_{\text{выд}}; \quad (2.1)$$

$$HB_{1/2R} = 3,54 + 7,5 \cdot [C] + 9,8 \cdot [Mn] + 15,7 \cdot [Cr] + 0,022 \cdot t_{\text{выд}}, \quad (2.2)$$

где  $HB_{\text{пов}}$  и  $HB_{1/2R}$  – твердость шаров на поверхности и на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса;  $[C]$ ,  $[Mn]$  и  $[Cr]$  – содержание углерода, марганца и хрома в стали, %;  
 $t_{\text{выд}}$  – температура выдачи заготовок под прокатку, °С.

Установлено значимое влияние повышения содержания углерода, серы и фосфора в стали, а также снижения температуры выдачи заготовок под прокатку на увеличение отбраковки шаров при их копровых испытаниях:

$$O_K = 2,55 + 5,01 \cdot [C] + 12,6 \cdot [S] + 9,8 \cdot [P] - 0,003 \cdot t_{\text{выд}}, \quad (2.3)$$

где  $O_K$  – отбраковка шаров при копровых испытаниях, %;  
 $[C]$ ,  $[S]$  и  $[P]$  – содержание углерода, серы и фосфора в стали, %;  
 $t_{\text{выд}}$  – температура выдачи заготовок под прокатку, °С.

Таблица 2.5 – Интервал изменения параметров производства мелющих шаров из стали Ш2.3

Наименование параметра	Единицы измерения	Диапазон значений	Среднее значение
Твердость шаров			
- поверхностная	HRC	48-56	54
- на глубине $\frac{1}{2}$ радиуса шара	HRC	35-49	42
Отбраковка шаров при копровых испытаниях	%	0-9,22	3,57
Содержание химических элементов в стали:			
- C	%	0,66-0,75	0,70
- Mn	%	0,69-0,78	0,74
- Si	%	0,22-0,27	0,23
- Cr	%	0,30-0,38	0,34
- Ni	%	0,02-0,10	0,06
- Cu	%	0,03-0,07	0,04
- S	%	0,008-0,019	0,013
- P	%	0,007-0,024	0,016
Длительность нагрева заготовок под прокатку	мин.	15-25	21
Температуры выдачи заготовок из нагревательной печи	°С	880-993	937

При этом наибольшую степень относительного влияния, как на твердость (рисунок 2.1), так и на ударную стойкость мелющих шаров оказывает температура их прокатки (рисунок 2.2).

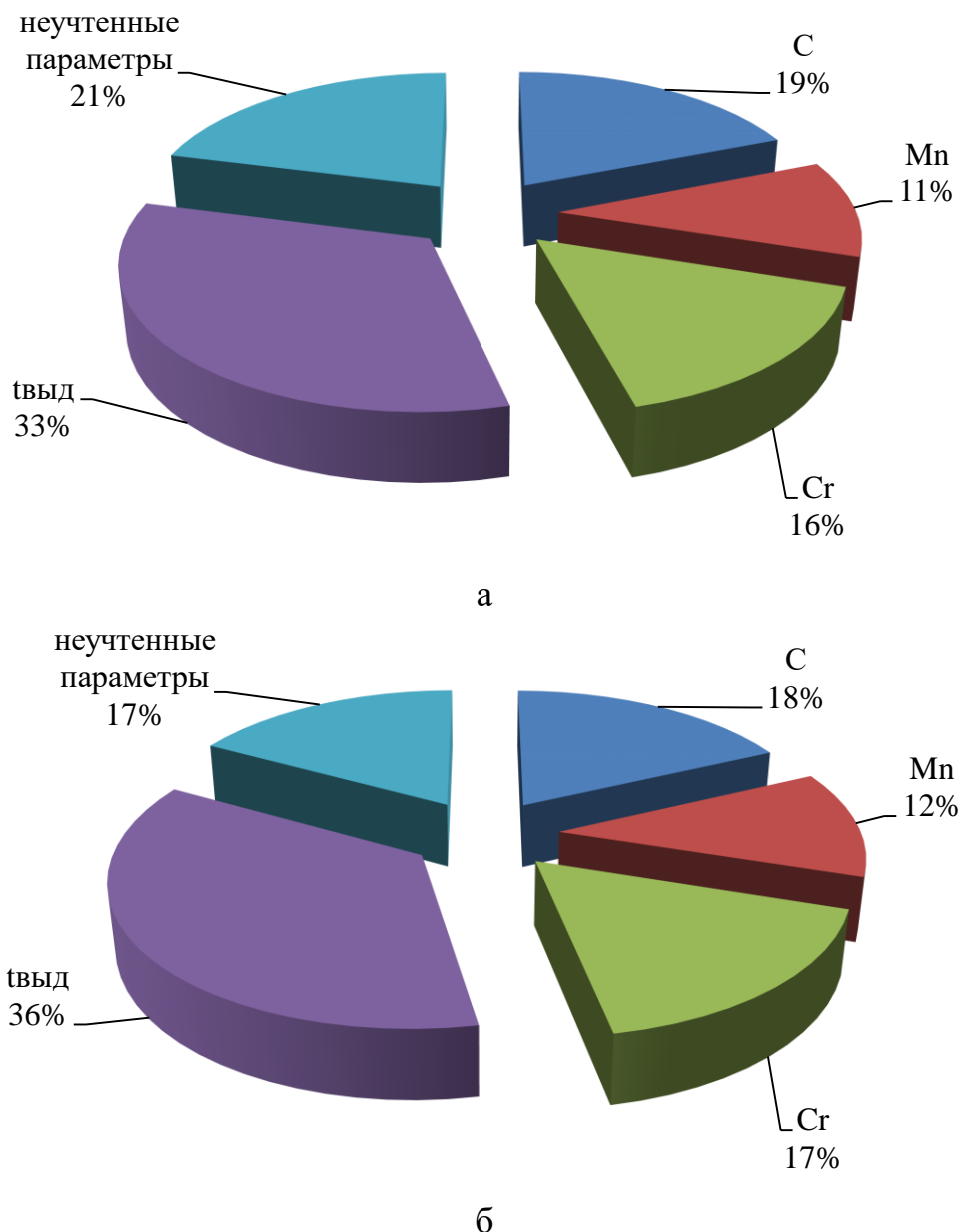


Рисунок 2.1 – Относительная степень влияния параметров производства мелющих шаров на их твердость: а – поверхностную; б – на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса

Выявленные закономерности влияния химического состава стали на показатели твердости и ударной стойкости закаленных шаров соответствуют общепринятым представлениям [121, 122]. При увеличении содержания углерода до значения порядка 0,7% повышается твердость образующегося мартенсита, а

прокаливаемость стали возрастает при повышении содержания углерода до 0,8%. То есть углерод закономерно увеличивает, как поверхностную твердость, так и твердость на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса шара. Также закономерным является снижение пластических свойства стали, что сказывается на устойчивости мелющих шаров к ударным нагрузкам. Влияние марганца на твердость шаров связано, прежде всего, с повышением их прокаливаемости при увеличении содержания данного элемента в стали. Повышение твердости шаров при увеличении содержания хрома в стали связано с повышением твердости мартенсита, а также увеличением прокаливаемости стали.

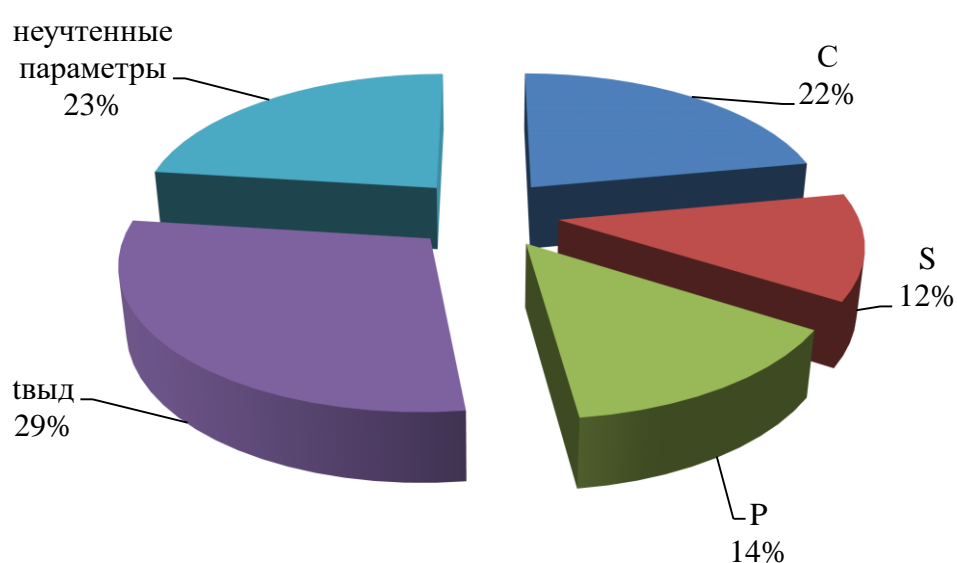


Рисунок 2.2 – Относительная степень влияния параметров производства мелющих шаров на их ударную стойкость

С целью определения механизмов влияния температуры прокатки мелющих шаров на увеличение их твердости и ударной стойкости проведено моделирование изменения температуры поверхности шаров в процессе их прокатки и подстуживания перед закалкой. Моделирование проводили с использованием прикладного программного комплекса DEFORM, принцип работы которого основан на использовании метода конечных элементов [123, 124].

По полученным в ходе моделирования данным [125] после прокатки происходит снижение температуры поверхности шаров в среднем на 70°C; при этом вне зависимости от температуры нагрева заготовок имеет место

значительная, до 50°C, неравномерность распределения температуры по поверхности шаров (рисунок 2.3). В наибольшей степени это обусловлено наличием локальных зон повышенной температуры в местах наиболее интенсивной деформации (в местах внедрения реборды в заготовку при прокатке).

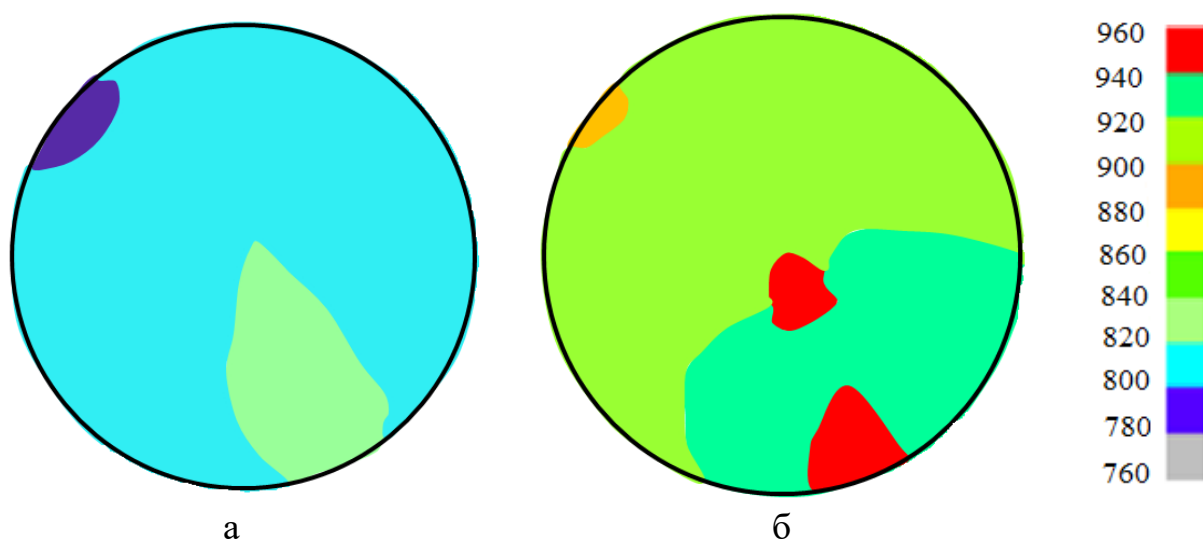


Рисунок 2.3 – Распределение температурных полей на поверхности шаров диаметром 60 мм после их прокатки с температурой 880°C (а) и 1000°C (б)

Полученные результаты свидетельствуют, что после охлаждения шаров на конвейере температура их поверхности практически выравнивается вне зависимости от температуры прокатки (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Результаты моделирования динамики изменения температуры мелющих шаров диаметром 60 мм при их прокатке и охлаждении

Температура выдачи заготовок из печи, °C	Температура поверхности шаров после прокатки, °C		Время под-стуживания, с	Температура поверхности шаров перед закалкой, °C		Необходимая температура шаров перед закалкой / температура фазового превращения, °C
	min	max		min	max	
880	792	833	95	758	774	800-860 / 746-764
1000	898	951	100	853	862	

При этом необходимо обратить внимание на то факт, что при минимально допустимой температуре выдачи заготовок под прокатку вне зависимости от

продолжительности охлаждения мелющих шаров на конвейере после прокатки температура поверхности шаров перед закалкой имеет значение, близкое к температуре фазового превращения для стали Ш2.3 (таблица 2.6).

Исходя из механизмов формирования закалочной микроструктуры стали рассматриваемого химического состава такая температура шаров является недостаточной для получения однородной мартенситной структуры, обладающей высокой твердостью, что подтверждено металлографическими и дюрометрическими исследованиями мелющих шаров из 10 партий стали Ш2.3 текущего производства. По результатам проведенных исследований установлено, что микроструктура мелющих шаров, прокатанных из заготовок с температурой нагрева, близкой к нижней границе допустимого интервала ( $880^{\circ}\text{C}$ ), представляет собой мартенсит + феррит (рисунок 2.4). При этом характеристики таких шаров соответствуют 2-ой группе твердости по ГОСТ 7524-2015 (таблица 2.7.).

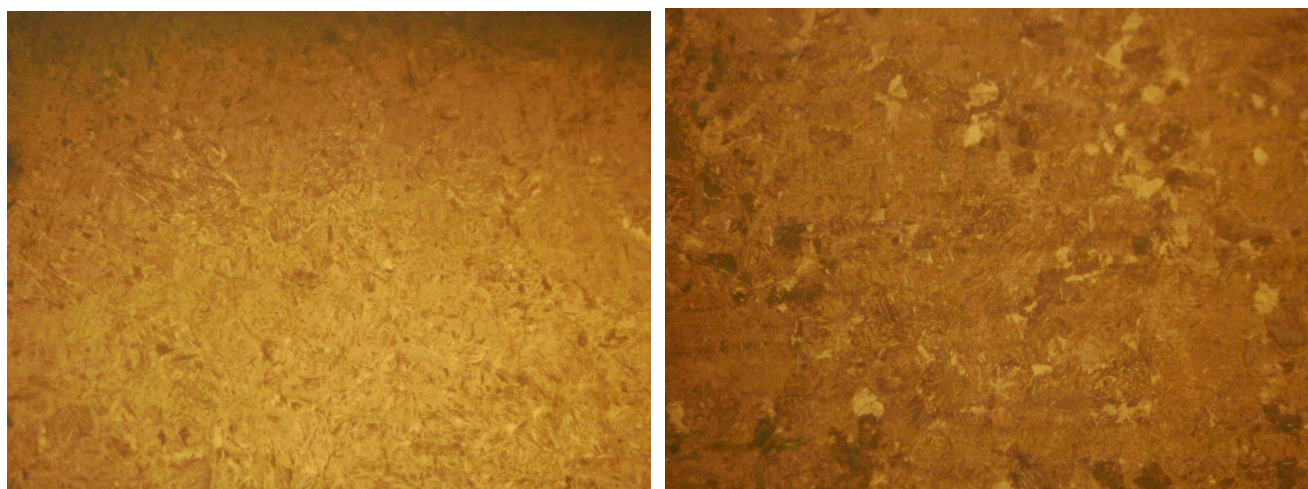
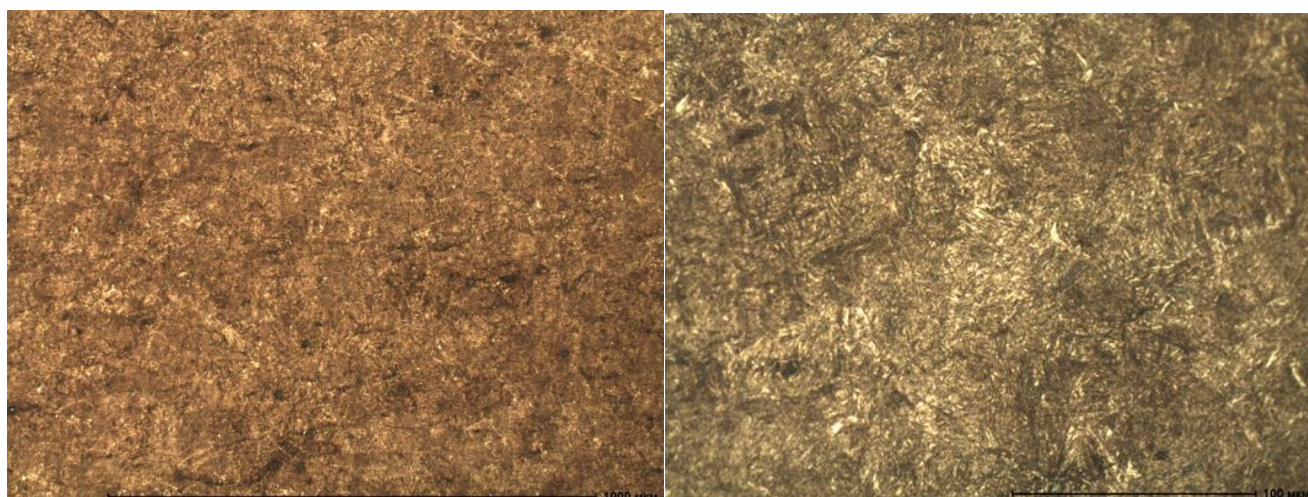


Рисунок 2.4 – Характерная микроструктура мелющих из стали Ш2.3, прокатанных при температуре  $880^{\circ}\text{C}$ , на поверхности (а) и на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса шара (б)

В то же время шары, прокатанные из заготовок с температурой нагрева, соответствующей верхнему пределу допустимого интервала ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) обладают однородной структурой, состоящей из мелкоигльчатого мартенсита (рисунок 2.5), и их твердость соответствует требованиям к 4-ой группе по ГОСТ 7524-2015 (таблица 2.7).



а

б

Рисунок 2.5 – Характерная микроструктура мелющих из стали Ш2.3, прокатанных при температуре 1000°С, на поверхности (а) и на глубине ½ радиуса шара (б)

Таблица 2.7 – Показатели качества мелющих шаров диаметром 60 мм из стали Ш2.3 при варьировании температуры их прокатки

Температура выдачи заготовок из печи, °С	Характерная микроструктура шаров		Твердость шаров, HRC		Доля шаров, отбракованных при испытаниях на ударную стойкость, %
	поверхность	на глубине ½ радиуса	поверхность	на глубине ½ радиуса	
880	мартенсит	мартенсит + феррит	48-50	35-42	5,8
1000	мартенсит	мартенсит	54-56	47-49	2,3
Требования к шарам согласно ГОСТ 7524-2024					
2-ая группа твердости			48	-	-
3-ая группа твердости			53	-	-
4-ая группа твердости			53	43	-

Также согласно полученных результатов (таблица 2.7) мелющие шары, прокатанные из заготовок с температурой нагрева 1000°С обладают повышенной ударной стойкостью по отношению к шарам, полученным из заготовок с температурой их выдачи из печи 880°С. Это обусловлено тем, что установленные особенности микроструктуры мелющих шаров, прокатанных с различной температурой (рисунки 2.4, 2.5), оказывают значимое влияние не только на твердость мелющих шаров, но и на их ударную стойкость. Шары с двухфазной структурой, представляющей собой мартенсит + феррит, закономерно обладают пониженной ударной стойкостью по отношению к шарам с однородной

мартенситной структурой.

### **2.3 Разработка и опытно-промышленное опробование энерго- и ресурсосберегающих производства режимов мелющих шаров, обеспечивающих повышение их твердости и ударной стойкости**

На основании обобщения результатов комплексных исследований, представленных в разделе 2.2, определены общие закономерности влияния химического состава и температуры прокатки мелющих шаров на их твердость и ударостойкость в фактическом интервале изменения рассматриваемых параметров (таблица 2.5):

- увеличение содержания углерода в стали повышает твердость шаров после термообработки, но снижает их ударную стойкость; при этом влияние содержания углерода на ударостойкость шаров имеет выраженный нелинейный характер;

- повышение содержания марганца и хрома приводит к увеличению твердости термообработанных шаров и не оказывает значимого влияния на их ударостойкость;

- увеличение содержания постоянных вредных примесей в стали (сера, фосфор) снижает ударную стойкость мелющих шаров, но при этом значимо не влияет на показатели их твердости;

- повышение температуры прокатки шаров обуславливает увеличение, как твердости, так и ударной стойкости мелющих шаров.

На основе представленных закономерностей для производства мелющих шаров 4-ой группы твердости повышенной ударостойкости оптимизированы требования к химическому составу стали Ш2.3 (таблица 2.8).

С целью дополнительного обоснования изменения температурного режима прокатки с учетом его влияния на качество получаемых шаров проведено компьютерное моделирование напряженного состояния металла при различной температуре прокатки в программном комплексе DEFORM.

Таблица 2.8 – Химический состав стали для производства мелющих шаров 4-й группы твердости по ГОСТ 7524-2015

Марка стали	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P
					не более			
Ш2.3 (базовая)	0,65- 0,75	0,70- 0,80	0,20- 0,35	0,30- 0,40	0,30	0,30	0,020	0,030
Ш2.3 (оптимизированная)	0,70- 0,73	0,80- 0,85	0,20- 0,35	0,40- 0,45	0,30	0,30	0,015	0,020

Полученные результаты моделирования, представленные в виде распределения интенсивности напряжений по укрупненным зонам поверхности шаров, свидетельствуют о формировании значительной неравномерности напряжений вне зависимости от температуры прокатки (рисунок 2.6).

Так наибольшая интенсивность напряжений имеет место в зонах врезки реборды в исходную заготовку, также зоны с повышенной интенсивностью напряжений локализованы в местах повторной врезки реборды в тело заготовки после оборотов валков. В остальных зонах поверхности шаров величина напряжений незначительна. В целом схемы напряженного состояния металла при различных температурных режимах прокатки имеют аналогичный характер, но при этом величины напряжений значимо определяются температурой деформации. При температуре прокатки, соответствующей нижней границе существующего допустимого интервала (880°С), средние значения напряжений по укрупненным зонам поверхности значительно ниже по сравнению с напряжениями, формирующиеся в аналогичных зонах при температуре прокатки 1000°С, соответствующей верхней границе допустимого интервала. Особенно значимо разница в величине напряжений проявляется в отдельных точках контакта металла с валками. При температуре деформации 880°С такие точечные напряжения достигают значительных величин (до 400 МПа), а при температуре деформации 1000°С максимальные точечные напряжения не превышают 325 МПа.

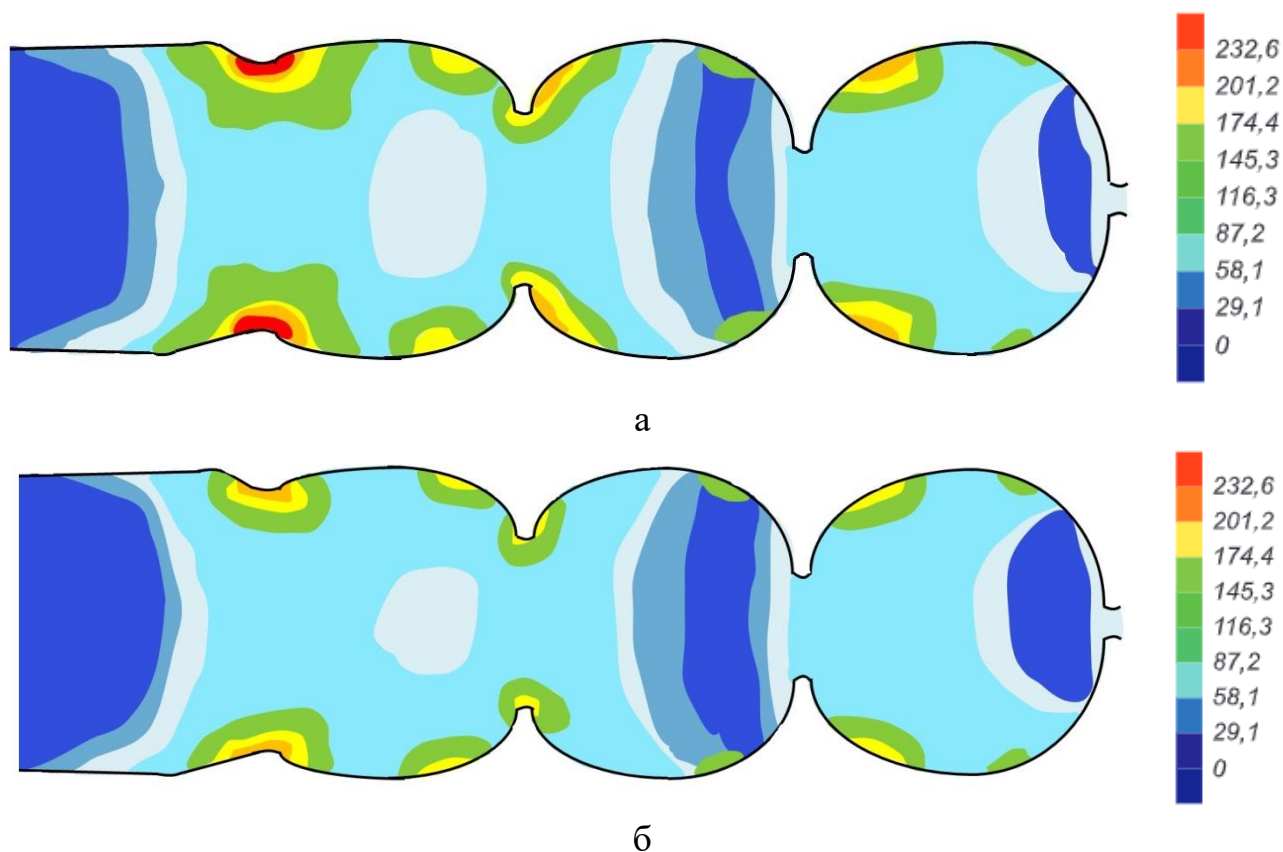


Рисунок 2.6 – Распределение интенсивности напряжений по поверхности мелющих шаров в процессе прокатки при температуре нагрева исходных заготовок 880°С (а) и 1000°С (б)

Таким образом, повышение температуры прокатки мелющих шаров рассматриваемом интервале ее изменения приводит к формированию более благоприятной схемы напряженного состояния металла, что снижает вероятность образования дефектов шаров, а также уменьшает нагрузку на основное оборудование прокатной клетки, что подтверждается фактическими данными промышленной прокатки (рисунок 2.7). При этом необходимо обратить внимание на выраженный нелинейный характер полученной зависимости усилия прокатки от температуры нагрева исходных заготовок под прокатку. Значительное (примерно на 30%) уменьшение усилия прокатки наблюдается при повышении температуры прокатываемых заготовок с 880°С до 950-960°С, а дальнейшее повышение температуры прокатки практически не оказывает влияние на усилие прокатки.

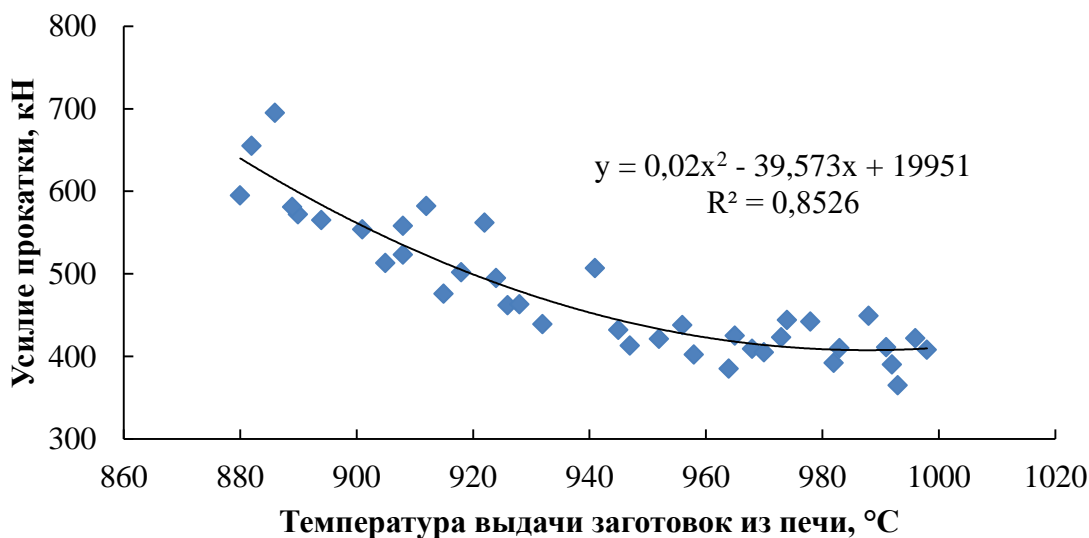


Рисунок 2.7 – Влияние температуры выдачи заготовок под прокатку на усилие прокатки при производстве мелющих шаров

Как указано выше, для достижения повышенной температуры заготовок на выдаче из печи необходимо изменение режимов ее работы. На практике повышение температуры нагреваемых заготовок может быть достигнуто, как за счет интенсификации процесса нагрева, так и за счет увеличения продолжительности процесса. Проведенный анализ работы камерной печи рассматриваемого прокатного стана показал наличие прямой линейной взаимосвязи между температурой выдачи заготовок под прокатку продолжительностью нагрева заготовок (рисунок 2.8).

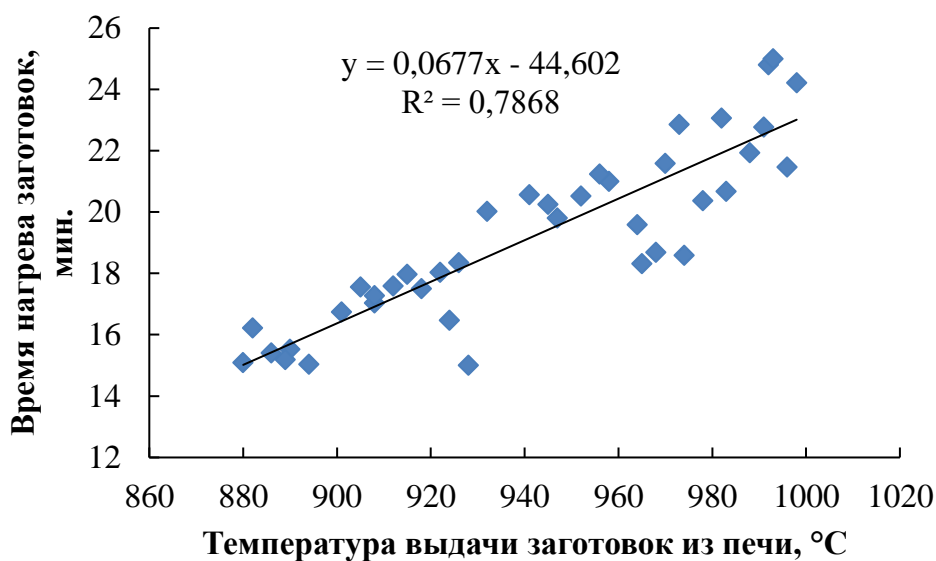


Рисунок 2.8 – Взаимосвязь температуры заготовок на выдаче из печи и продолжительности их нагрева

При повышении температуры заготовок, выдаваемых под прокатку с 880°C до 1000°C средняя продолжительность нахождения заготовок в печи возрастает в среднем на 8 мин.

Полученные закономерности влияния температуры нагрева исходных заготовок на параметры прокатки (рисунок 2.7) и режимы работы нагревательной печи (рисунок 2.8) объясняют характер фактических зависимостей удельных расходов электроэнергии на прокатку и топлива на нагрев от температуры прокатки (рисунок 2.9). По полученным данным повышение температуры выдачи заготовок из нагревательной печи обуславливает снижение удельного расхода электроэнергии при одновременном повышении расхода топлива на нагрев (рисунок 2.9).

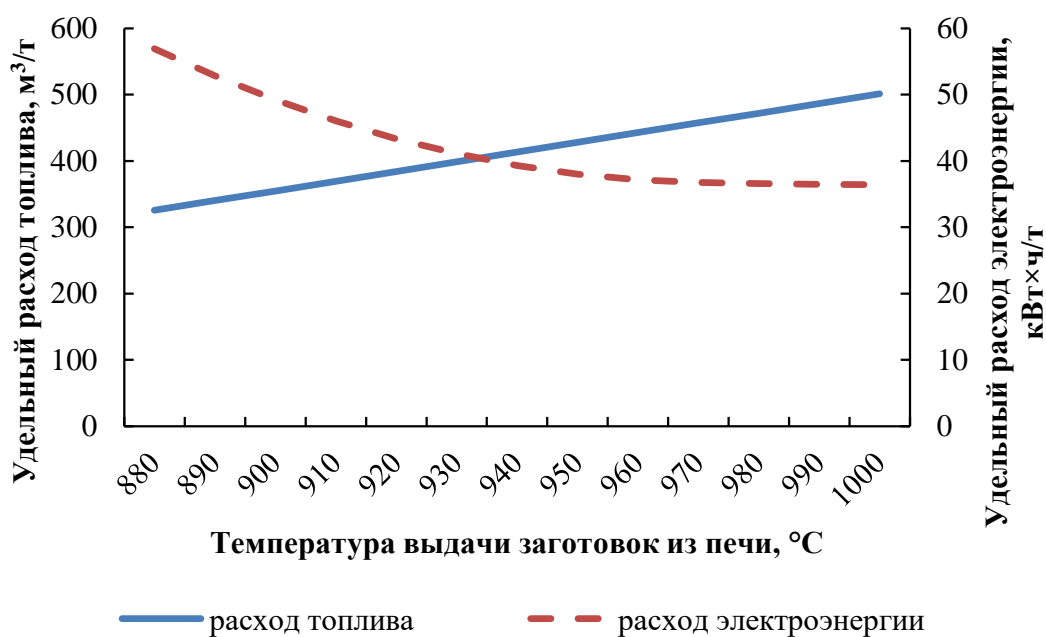


Рисунок 2.9 – Зависимость удельных расходов энергоносителей от температурного режима нагрева заготовок под прокатку

Также повышение температуры выдачи заготовок под прокатку способствует повышению величины потерь металла на угар и окалинообразование (рисунок 2.10). Комплексная оценка прогнозного изменения удельных расходов энергоносителей и потерь металла при производстве мелющих шаров в зависимости от температурного режима их прокатки (температуры выдачи заготовок под прокатку) показала, что наиболее оптимальной является

температура выдачи заготовок из нагревательной печи 980-1000°C.

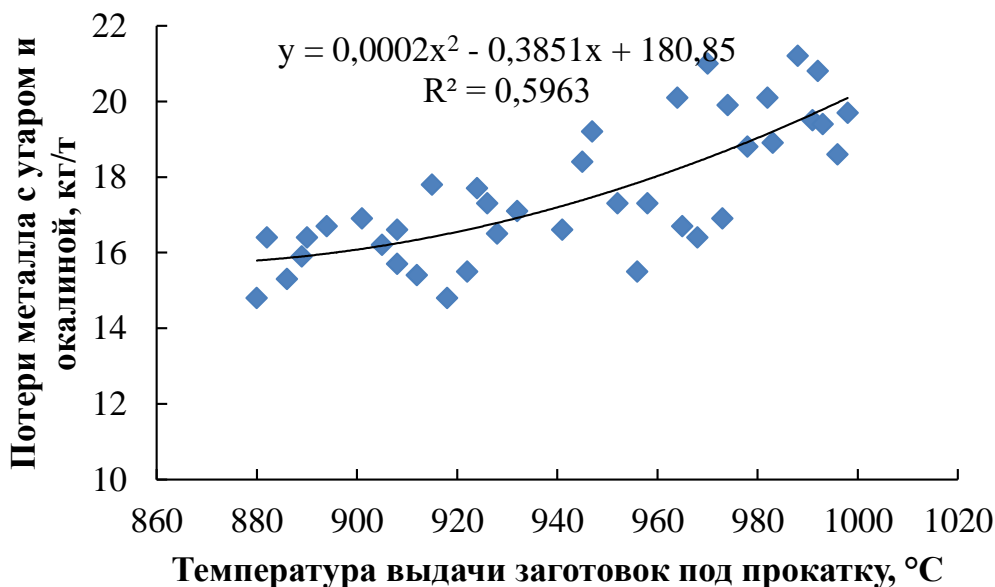


Рисунок 2.10 – Влияние температурного режима нагрева заготовок под прокатку на потери металла в виде угара и окалины

С целью комплексной оценки влияния температуры выдачи заготовок под прокатку на технико-экономические показатели производства мелющих шаров использован интегральный показатель, характеризующий расход энерго- и материальных ресурсов, а также потерь металла:

$$K_{\text{ИНТ}} = a_{\text{ЭЛ}} \cdot \Delta P_{\text{ЭЛ}} + a_{\text{Т}} \cdot \Delta P_{\text{Т}} + a_{\text{В}} \cdot \Delta P_{\text{В}} + a_{\text{УГ}} \cdot \Delta\Pi_{\text{УГ}} + a_{\text{БР}} \cdot \Delta\Pi_{\text{БР}}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{Т}}$ ,  $\Delta P_{\text{В}}$  – относительное изменение удельного расхода электроэнергии на прокатку, топлива на нагрев заготовок и прокатных валков соответственно по сравнению с базовым значением;

$\Delta\Pi_{\text{УГ}}$ ,  $\Delta\Pi_{\text{БР}}$  – относительное изменение потерь металла в виде угара и окалины в процессе нагрева заготовок и брака мелющих шаров соответственно по сравнению с базовым значением;  $a_{\text{ЭЛ}}$ ,  $a_{\text{Т}}$ ,  $a_{\text{В}}$  – весовые коэффициенты, учитывающие степень влияния удельных расходов электроэнергии на прокатку, топлива на нагрев заготовок и прокатных валков соответственно;  $a_{\text{УГ}}$ ,  $a_{\text{БР}}$  – весовые коэффициенты, учитывающие степень влияния потерь металла в виде угара и окалины в процессе нагрева заготовок и брака мелющих шаров соответственно.

Величины весовых коэффициентов (таблица 2.9) определены исходя из

величин затрат или потерь в стоимостном выражении, размеров сопутствующих дополнительных расходов и существующих технических ограничений.

Таблица 2.9 – Весовые коэффициенты параметров при расчете интегрального показателя ресурсо-, материало- и металлосбережения

Наименование показателя	Величина весового коэффициента
Удельный расход электроэнергии на прокатку	0,10
Удельный расход топлива на нагрев заготовок	0,10
Удельный расход прокатных валков	0,15
Удельные потери в виде угара и окалины при нагреве заготовок	0,05
Отбраковка мелющих шаров в относительном выражении	0,60

При расчете относительного изменения величины удельных расходов энерго- и материальных ресурсов и потерь металла в качестве базовых значений приняты показатели для минимально допустимой температуры выдачи заготовок из нагревательной печи (880°C):

$$\Delta P_{t(i)} = P_{(t=880)} / P_{t(i)}, \quad (2.5)$$

где  $\Delta P_{t(i)}$  – относительное изменение показателя относительно базового значения при  $i$ -той температуре выдачи заготовок под прокатку;  $P_{(t=880)}$  – базовое значение показателя;  $P_{t(i)}$  – значение показателя при  $i$ -той температуре выдачи заготовок под прокатку.

Значения показателей, соответствующих конкретным температурам выдачи заготовок под прокатку определяли исходя из представленных выше уравнений регрессии (уравнение (2.3), рисунки 2.9, 2.10), при этом прогнозные значения удельного расхода прокатных валков определяли исходя из закономерностей влияния температуры выдачи заготовок на усилие прокатки (рисунок 2.7).

Исходя из представленной методики расчета оптимальным температурным интервалом выдачи заготовок под прокатку является интервал, соответствующий минимальному значению интегрального показателя, в данном случае составляющий 980-1030°C (рисунок 2.11).

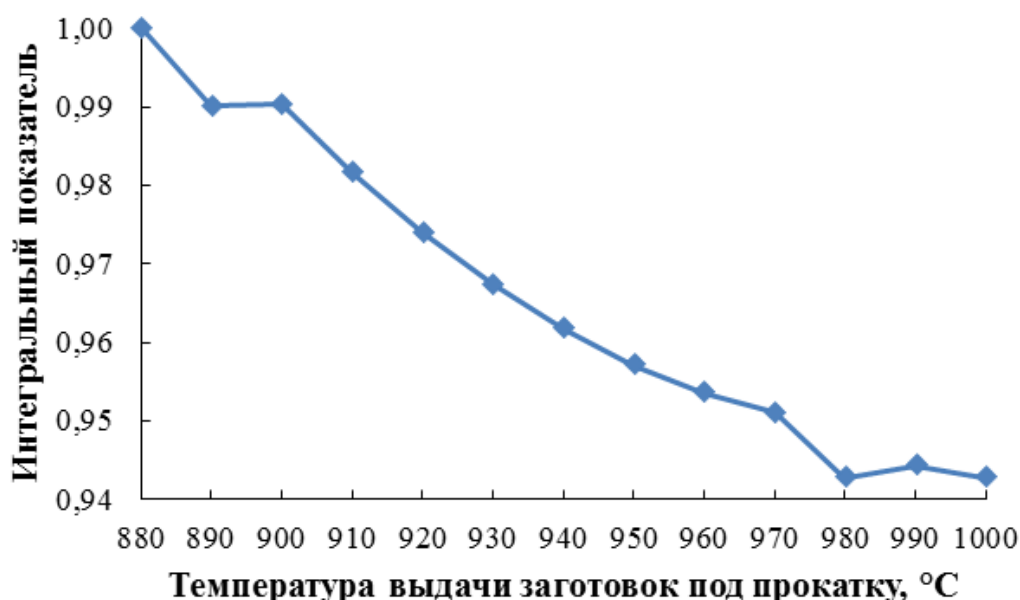


Рисунок 2.11 – Влияние температуры выдачи заготовок под прокатку мелющих шаров на интегральный показатель ресурсо-, материало- и металлосбережения

Прокатка 100 партий мелющих шаров из стали разработанного химического состава с использованием оптимизированного температурного режима деформации подтвердила его эффективность (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Сравнительный анализ показателей производства мелющих шаров при различных режимах их производства

Наименование показателя	Ед. измерения	Значение показателя		Отклонение	
		сталь Ш2.3, базовый режим прокатки	сталь Ш2.3 оптимизированная, новый режим прокатки	абс.	отн., %
Отбраковка шаров:					
- при копровых испытаниях	%	3,5	1,6	-1,9	-54
- по твердости	%	1,7	0,7	-1,0	-59
Удельные расходы:					
- электроэнергии на прокат	кВт×ч/т	42	36	-9	-14
- природного газа на нагрев заготовок	м <sup>3</sup> /т	412	523	+111	+57
- прокатных валков	кг/т	0,64	0,52	-0,12	-19
Потери металла с угаром и окалиной	кг/т	15,8	19,3	+3,5	+22

Зафиксировано значительное снижение отбраковки мелющих шаров по причине пониженной твердости и ударной стойкости по сравнению с шарами стали Ш2.3, прокатанными по стандартному режиму.

## 2.4 Выводы

1. На основании комплексных исследований параметров текущего производства мелющих шаров массового сортамента в условиях действующего стана 40-100 определены закономерности влияния температурных условий прокатки шаров и их химического состава на показатели твердости и ударной стойкости мелющих шаров после их термической обработки. Статистическими исследованиями установлено, что на повышение твердости термообработанных мелющих шаров, как поверхностной, так и на глубине  $\frac{1}{2}$  радиуса, а также на увеличение их ударной стойкости наибольшее относительное влияние оказывает повышение температуры их прокатки. Компьютерным моделированием динамики температурных полей в процессе деформации и последующего подстуживания мелющих шаров под закалку установлен механизм влияния температуры прокатки мелющих шаров на показатели их твердости и ударостойкости. Установлено, что при температуре прокатки мелющих шаров, соответствующей нижней границе фактического диапазона ее изменения (880-1000°C), температура мелющих шаров перед закалкой близка к температуре фазового превращения. В результате в шарах после закалки формируется двухфазная структура мартенсит+феррит, обладающая пониженной и неравномерной твердостью, а также пониженной устойчивостью к ударным нагрузкам, что подтверждено результатами металлографических исследований. Установлено, что увеличение содержания углерода, марганца и хрома в допустимых пределах для стали марки Ш2.3 значимо влияет на повышение показателей твердости мелющих шаров; при этом ударная стойкость мелющих шаров значимо снижается при повышении содержания в них углерода, серы и фосфора.

2. На базе полученных закономерностей, а также опираясь на результаты

дополнительно проведенных аналитических исследований влияния температуры прокатки на технико-экономические показатели производства мелющих шаров и компьютерного моделирования напряженного состояния металла при прокатке шаров, разработан оптимизированный химический состав стали и обоснован оптимальный энерго- и металлосберегающий температурный режим производства мелющих шаров 4-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015. Опытно-промышленное опробование данного режима прокатки шаров из стали оптимизированного химического состава показало снижение отбраковки мелющих шаров на 1,9% при испытаниях на ударную стойкость и на 1,0% по причине пониженной твердости мелющих шаров, снижение удельных расходов электроэнергии на 9 кВт×ч/т и прокатных валков на 0,12 кг/т (подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве).

### **3 Исследования деформационных характеристик экспериментальных легированных сталей для производства мелющих шаров повышенной объемной твердости и ударной стойкости**

#### **3.1 Обоснование химического состава и исследование особенностей структуры и свойств экспериментальных сталей на технологических этапах производства мелющих шаров**

Исследованиями, проведенными в рамках совершенствования технологии производства мелющих шаров 4-й группы твердости по ГОСТ 7524-2015 на действующем шаропрокатном стане 40-100 (глава 2), показано наличие значимого потенциала для повышения твердости шаров за счет оптимизации содержания химических элементов в стали в пределах требований для стандартных марок стали. В то же время полученные результаты свидетельствуют, что уровень твердости производимых шаров из стали оптимизированного химического состава даже с учетом применения усовершенствованного температурного режима прокатки является недостаточным для получения шаров 5-й группы твердости по ГОСТ 7524-2015. Имеющиеся данные множества исследований [4, 6, 55] свидетельствуют, что производство мелющих шаров 5-ой группы твердости, в особенности с учетом необходимой высокой ударостойкости шаров, требует применения сталей, легированных до значительных концентраций дорогостоящими элементами: хром, никель, молибден и т.д. Использование таких сталей закономерно увеличивает себестоимость производства мелющих шаров, поэтому актуальной задачей является обоснование состава экономнолегированных сталей, обеспечивающих заданный уровень свойств готовых шаров.

При разработке вариантов экспериментальных сталей для производства мелющих шаров (таблица 3.1) руководствовались положениями, основанными на

общепринятых представлениях о влиянии химического состава стали на их механические свойства [121, 122], результатами исследований в рамках представленной работы, а также имеющимися данными о химическом составе специализированных сталей, используемых для массового производства мелющих шаров (в соответствии с СТО 899-36-2012, ТУ 1171-078-00186223-2016).

Таблица 3.1 – Химический состав опытных сталей

Варианты состава	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	S	P
1	0,70-0,75	0,30-0,40	0,75-0,85	0,3-0,5	-	0,03-0,05	He более 0,015	He более 0,015
2	0,70-0,75		0,70-0,80	1,4-1,6	0,7-0,8	0,03-0,05		
3	0,80-0,85		0,80-0,90	0,8-1,0	-	0,08-0,10		
4	0,70-0,75		0,70-0,80	1,6-1,8	0,8-0,9	0,03-0,05		
5	0,73-0,78		0,70-0,80	1,0-1,2	0,4-0,5	0,03-0,05		

Вышеприведенными (глава 2) исследованиями установлено значимое влияние повышения содержания углерода в стали в диапазоне 0,66-0,75% на увеличение твердости шаров при одновременном снижении их ударной стойкости. При этом согласно общепринятых представлений повышение содержания углерода в сталях, подвергаемых закалке, до значений более 0,7-0,8% не является целесообразным с точки зрения повышения твердости. Исходя из этого в 4-х разработанных вариантах химического состава содержание углерода в стали находится в диапазоне 0,70-0,78% (таблица 3.1). Вариант химического состава с содержанием углерода, соответствующим заэвтектоидной стали (0,83-0,85%), рассмотрен с целью получения более полной информации о закономерностях формирования свойств мелющих шаров и трансформации их структуры в процессе производства.

Влияние кремния на свойства сталей заключается в повышении их прочностных характеристик и твердости при одновременном снижении пластических свойств. При этом значимое влияние кремния на свойства сталей начинает проявляться при легировании данным элементом до концентрации более 1%. В существующей отечественной нормативной документации производителей

мелющих шаров (СТО 899-36-2012, ТУ 1171-078-00186223-2016) для сталей, предназначенных для получения мелющих шаров повышенных групп твердости допустимый интервал изменения содержания кремния составляет 0,20-0,50%; в опытных марках стали содержание кремния находится примерно в этом же интервале – 0,15-0,40% [11, 12, 14, 55-59]. Во всех предлагаемых вариантах химического состава (таблица 3.1) содержание кремния принято на среднем уровне в рамках выше обозначенного интервала и составляет 0,30-0,40%.

Повышение содержания марганца в сталях увеличивает их прокаливаемость, поэтому для мелющих шаров повышенных групп твердости согласно требований нормативной документации содержание марганца составляет 0,65-0,90%. В соответствии с этим предложены варианты химического состава с содержанием марганца на уровне 0,70-0,90% (таблица 3.1).

Увеличение содержания хрома обуславливает повышение твердости закаленных сталей за счет увеличения твердости мартенсита. Кроме того, хром существенно повышает прокаливаемость сталей и препятствует росту зерна при нагреве, что является существенным при высоком содержании углерода и марганца. В отечественных сталях, используемых для производства мелющих тел повышенных групп твердости, содержание хрома регламентировано в пределах 0,20-0,75%; в сталях, используемых рядом ведущих мировых производителей, верхний предел содержания хрома заметно выше и составляет от 1,0% до 1,8% [12, 34]. Предложенные варианты химического состава №2-5 по содержанию хрома соответствуют указанным зарубежным аналогам, а вариант №1 выбран в качестве сравнительного со средним значением содержания хрома на уровне шаровых сталей отечественного производства.

Никель увеличивает прокаливаемость стали, при этом в случае повышенного содержания марганца и хрома его влияние усиливается. В соответствии с этим содержание никеля в сталях, используемых для производства мелющих шаров, варьируют в зависимости от концентрации в них марганца и хрома. В варианте химического состава №5 содержание никеля соответствует верхнему пределу для ряда сталей отечественного производства, а в вариантах №2 и №4 – превышает указанное содержание данного элемента. В сталях №1 и №3 никель в качестве легирующей

добавки не вводился.

Легирование ванадием способствует измельчению зерна и повышению ударной вязкости сталей даже при незначительных его концентрациях в стали. Так, например, в рельсовых сталях, для которых ударная вязкость является одной из наиболее важных характеристик, содержание ванадия составляет 0,03-0,15%. Помимо увеличения ударной вязкости ванадий также способствует некоторому повышению твердости, что особенно сильно проявляется при содержании ванадия более 0,08% и дополнительно легировании азотом. В этом случае происходит образования нитридов и карбонитридов ванадия, способствующих повышению твердости стальных изделий. Применительно к сталям, предназначенным для производства мелющих шаров высокой объемной твердости, имеются сведения об успешном применении стали марки 75ХГФН на основе марки 76ХГФА с содержанием ванадия 0,1-0,2% [4], в работах [11, 58] разработаны опытные стали с содержанием ванадия на уровне 0,15-0,25% и 0,03-0,18% соответственно. Согласно имеющимся литературных данных зарубежные производители мелющих шаров не используют стали, легированные ванадием. Опираясь на указанные данные, содержание ванадия в 4-х вариантах экспериментальных сталей принято на уровне 0,03-0,05%, а в одном варианте – на уровне 0,08-0,10%.

Предельные концентрации постоянных вредных примесей (сера и фосфор) для всех экспериментальных сталей ограничены более низкими значениями по отношению к большинству качественных сталей и составляют 0,015%. Аналогично содержание примесей цветных металлов ограничено пределами не более 0,20%.

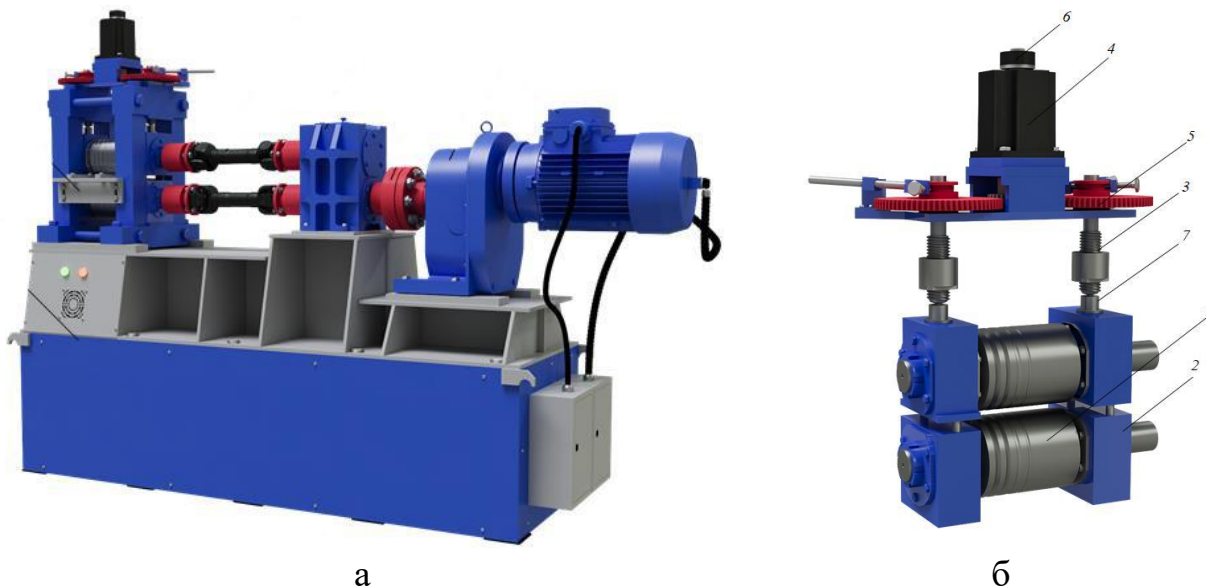
С целью определения особенностей формирования структуры и свойств экспериментальных сталей в процессе их прокатки и последующей термической обработки проведена серия лабораторных экспериментальных исследований [126]. По каждому из разработанных вариантов химического состава получили по 3 лабораторных слитка цилиндрической формы диаметром 6,2 мм, отлитых в формы после выплавки в 10 кг индукционной печи. Фактический диапазон изменения химического состава полученных образцов, определенный с помощью рентгеноспектрального анализа (спектрометр Shimadzu XRF-1800) представлен в

таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Фактический диапазон изменения содержания химических элементов в образцах сталей опытного состава

Варианты хим. состава	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	S	P
1	0,73-0,75	0,31-0,38	0,75-0,84	0,38-0,42	0,08-0,11	0,09-0,12	0,004-0,006	0,03-0,04	0,010-0,014	0,009-0,012
2	0,70-0,74	0,32-0,36	0,75-0,78	1,43-1,49	0,73-0,75	0,10-0,12	0,004-0,005	0,04	0,010-0,013	0,009-0,013
3	0,83-0,85	0,34-0,37	0,80-0,85	0,81-0,83	0,19-0,21	0,11-0,13	0,007	0,07-0,08	0,015-0,018	0,009-0,012
4	0,72-0,76	0,36-0,39	0,76-0,78	1,63-1,71	0,85-0,87	0,09-0,11	0,014-0,016	0,04	0,009-0,011	0,005-0,008
5	0,75-0,78	0,30-0,32	0,72-0,75	1,06-1,10	0,46-0,48	0,11-0,13	0,007	0,04	0,009-0,010	0,008-0,010

Полученные слитки нагревали в муфельной печи и прокатывали на автоматизированном лабораторном стане «ДУО-130» (рисунок 3.1), затем проводили закалку в воде и низкий отпуск полученных раскатов.



1 – прокатные валки, 2 – подушки, 3 – нажимные винты, 4 – шаговый двигатель, 5 – шестерни, 6 – энкодер, 7 – месдоза

Рисунок 3.1 Автоматизированный лабораторный прокатный стан «ДУО-130»: а – общий вид; б – прокатная клеть

Температура нагрева слитков под прокатку составляла 1000°С. Необходимо

подчеркнуть, что при проведении экспериментальных лабораторных исследований не ставилась задача физического моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки мелющих шаров, целью являлось определение основных закономерностей изменения структуры стали в процессе деформации и последующей термообработки для выбранных вариантов химического состава стали. Поэтому ограничились процессом продольной прокатки лабораторных слитков в круглом калибре.

При проведении лабораторных исследований температуру закалки выбирали исходя из химического состава стали. Проводили расчет температуры фазового превращения для каждого варианта химического состава стали по методике [120], температура закалки находилась в диапазоне на 30-50°C выше полученного значения критической температуры. Отпуск проводили путем нагрева раскатов до температуры 250°C с последующей выдержкой при заданной температуре в течение 2 ч.

В целом выбранная последовательность операций (рисунок 3.2) полностью моделирует технологические этапы производства мелющих шаров в реальных промышленных условиях.



Рисунок 3.2 – Последовательность операций при проведении лабораторных экспериментальных исследований

Для образцов, отобранных от слитков, проводили анализ микроструктуры в исходном (литом) состоянии, а также после каждого технологического этапа – после нагрева и прокатки, после закалки и отпуска. Также после всех этапов проводили замер поверхностной твердости раскатов, а для раскатов после отпуска проводили анализ твердости на глубине 0,25, 0,50, 0,75 радиуса от поверхности раската и в центральной его части.

Обработка результатов исследований позволила установить, что, несмотря на значительное различие в поверхностной твердости литых лабораторных

слитков различных вариантов химического состава различие данного показателя на раскатах, подвергнутых термообработке, является минимальным (таблица 3.3).

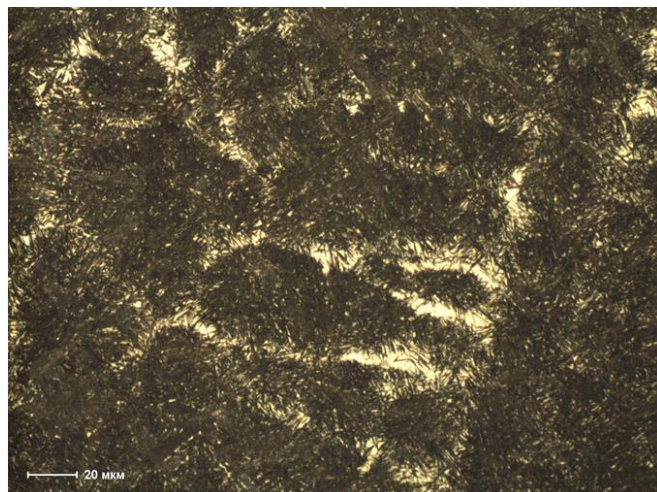
Таблица 3.3 – Изменение поверхностной твердости образцов экспериментальных сталей на стадиях термомеханической обработки

Вариант химического состава	Диапазон поверхностной твердости			
	в литом состоянии, HB	после нагрева под прокатку, HB	после закалки, HRC	после низкого отпуска, HRC
1	293-311	269-293	62-64	60-61
2	495-514	262-286	62-64	60-62
3	321-375	235-262	60-61	58-60
4	578-627	277-286	63-66	61-63
5	293-341	277-302	61-64	59-61

Значительные различия поверхностной твердости литых слитков рассматриваемых вариантов химического состава сталей обусловлены особенностями их микроструктуры (рисунок 3.3). Так в слитках вариантов химического состава №2 и №4 выявлена развитая дендритная ликвация (рисунок 3.3 б, г), в слитках варианта химического состава №5 данный дефект структуры является заметно менее выраженным (рисунок 3.3 д), а структура слитков варианта химического состава №1 фактически не имеет значимых дефектов (рисунок 3.3 а). Отличительной особенностью микроструктуры лабораторных слитков варианта химического состава №3 от перлитно-ферритной структуры всех остальных рассматриваемых вариантов является наличие карбидов по границам зерен. Это является закономерным следствием повышенного до заэвтектоидных значений содержания углерода в такой стали. Анализ микроструктуры слитков на различных стадиях их обработки в соответствии с выбранной последовательностью операций (рисунок 3.2) показал, что указанные отличительные особенности микроструктуры слитков доэвтектоидных сталей (варианты химического состава №1, 2, 4, 5) в значительной степени нивелируются уже после нагрева слитков под прокатку (рисунок 3.4) за счет перехода структуры в равновесное состояние и практически полностью исчезают в раскатах после их закалки (рисунок 3.5).



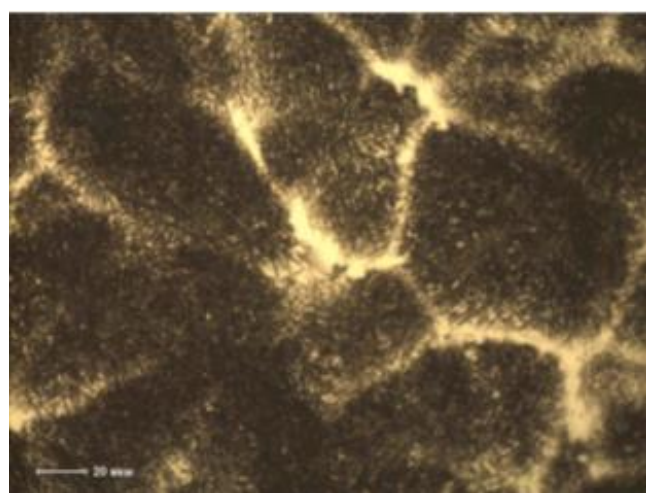
а



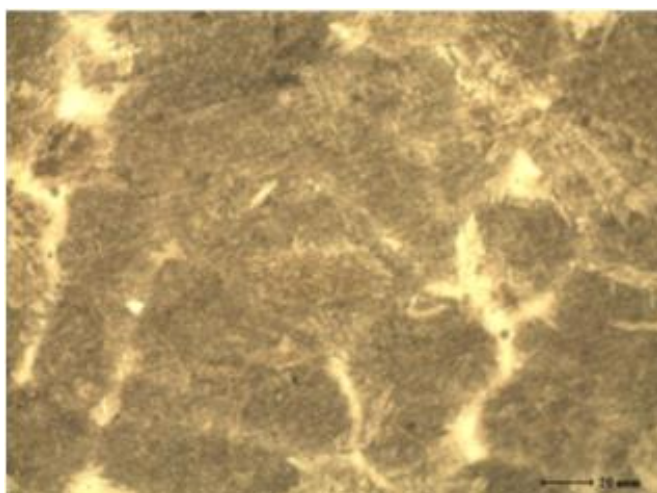
б



в



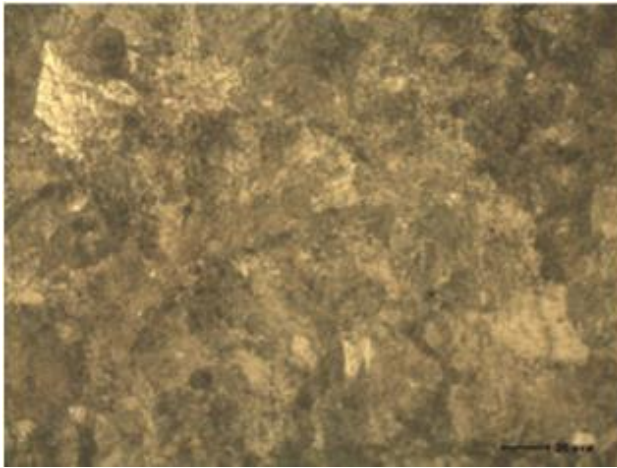
г



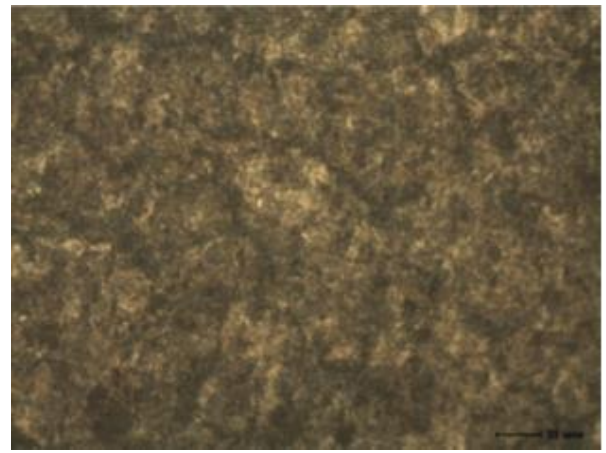
д

Рисунок 3.3 – Микроструктура лабораторных слитков в исходном состоянии различных вариантов химического состава:

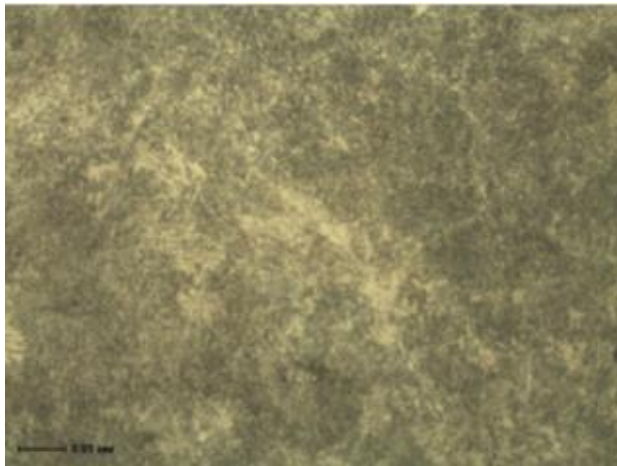
а – №1; б – №2; в – №3; г – №4; д – №5



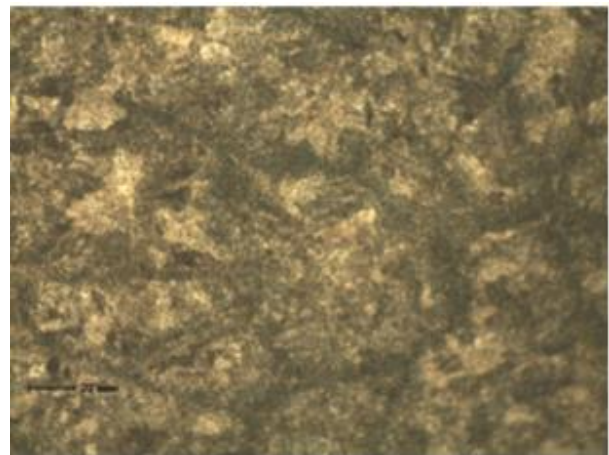
а



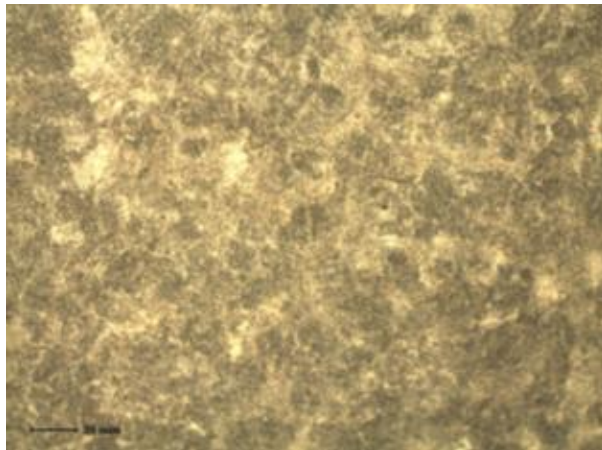
б



в



г



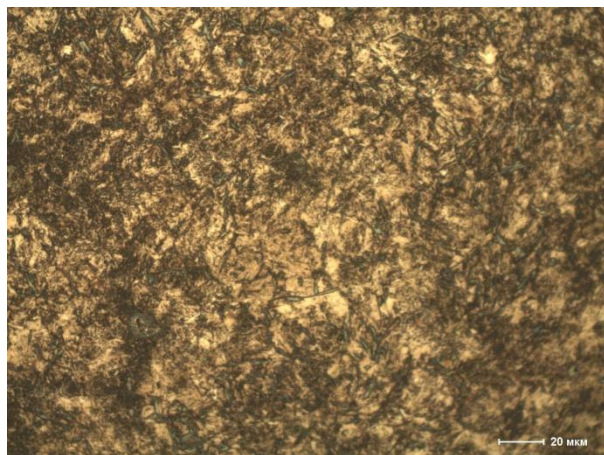
д

Рисунок 3.4 – Микроструктура лабораторных слитков после нагрева под прокатку различных вариантов химического состава:

а – №1; б – №2; в – №3; г – №4; д – №5

Фактически микроструктура раскатов рассматриваемых вариантов химического состава доэвтектоидных сталей (варианты №1, 2, 4, 5) после закалки является аналогичной и представляет собой мартенсит + карбиды + аустенит

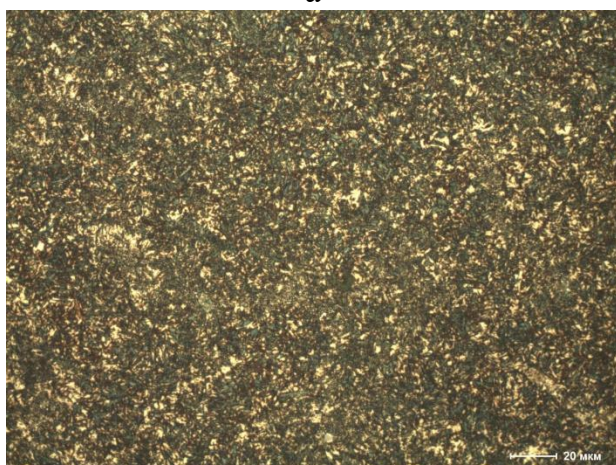
остаточный (рисунок 3.5 а, б, г, д). Микроструктура раската из заэвтектоидной стали (сталь №3) после закалки представляет собой мартенсит + карбиды цементитного типа + аустенит остаточный (рисунок 3.5 в); при этом количество аустенита остаточного понижено относительно доэвтектоидных сталей.



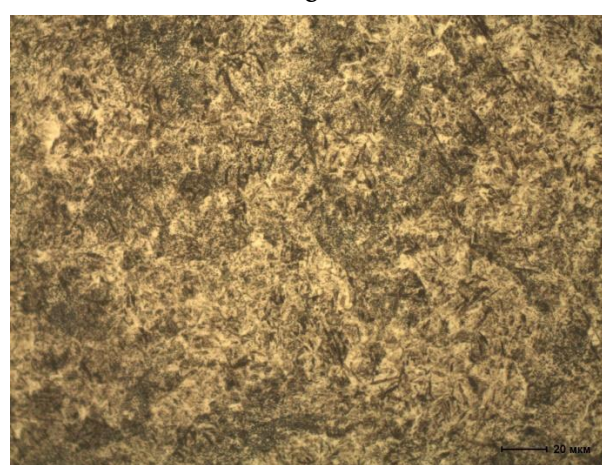
а



б



в



г



д

Рисунок 3.5 – Микроструктура раскатов различных вариантов химического состава после закалки:

а – №1; б – №2; в – №3; г – №4; д – №5

После низкого отпуска в структуре раскатов значительных изменений закономерно не зафиксировано. Для слитков всех вариантов химического состава имеет место снижение количества аустенита остаточного относительно структуры после закалки, мартенситные иглы приобретают более сглаженный вид, что и обуславливает некоторое (на 2-3 единицы) снижение твердости образцов.

Необходимо отметить, что абсолютные значения твердости поверхности раскатов после термообработки (таблица 3.3) соответствуют или незначительно ниже требований ГОСТ 7524-2015 для 5-ой группы твердости шаров в зависимости от их диаметра (таблица 1.1).

Анализ твердости шаров от образцов, отобранных на различной глубине термообработанных раскатов, показал аналогичную картину – различие в твердости между образцами различных вариантов химического состава является незначительным (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Твердость раскатов после термообработки

Вариант химического состава	Твердость по сечению раскатов, HRC					Объемная твердость, HRC
	поверхность	на глубине 0,25R	на глубине 0,50R	на глубине 0,75R	в центре	
1	60-61	57-58	52-54	51-52	47-49	57-59
2	60-62	55-57	53-54	52-54	49-50	57-58
3	58-60	55-58	55-57	53-54	48-50	58-59
4	61-63	54-56	53-54	52-54	51-53	57-58
5	59-61	56-58	50-52	51-52	49-51	58-59

При этом абсолютные значения объемной твердости, определенной согласно методике по ГОСТ 7524-2015, для всех рассматриваемых вариантов химического состава соответствуют требованиям для 5-ой группы твердости.

В целом полученные результаты экспериментальных лабораторных исследований свидетельствуют о возможности обеспечения требуемого уровня поверхностной и объемной твердости мелющих шаров для 5-ой группы по ГОСТ 7524-2015 при использовании всех разработанных вариантов экспериментальных сталей. При этом полученные результаты требуют подтверждения в производственных условиях. Кроме того, необходимы исследования ударной

стойкости мелющих шаров из сталей рассматриваемых вариантов химического, адекватные результаты которых также могут быть получены только в производственных условиях.

### **3.2 Исследования сопротивления пластической деформации сталей экспериментального химического состава**

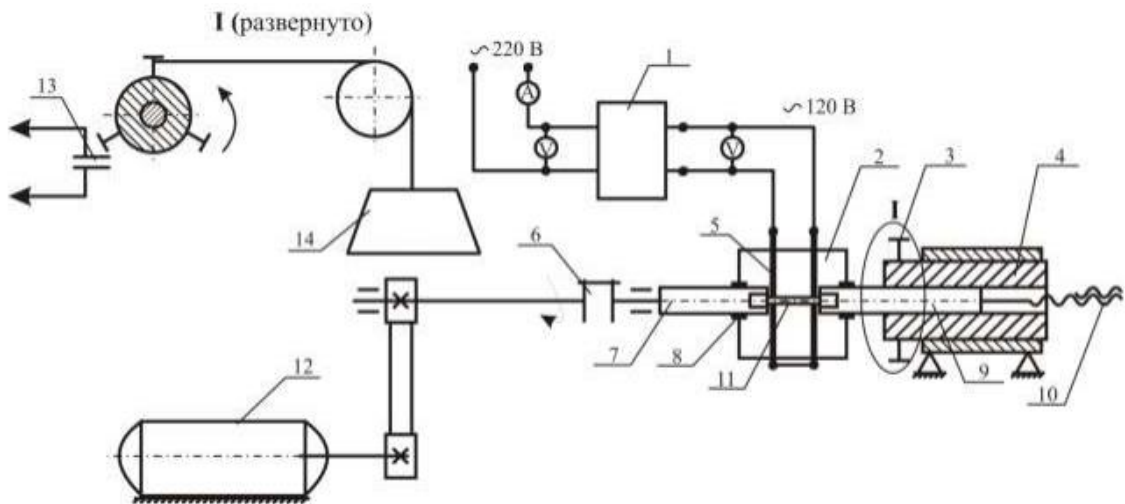
При определении технологичности и эффективности применения новых марок стали для производства проката, в том числе мелющих шаров и заготовок для их получения, важное значение имеет определение их пластических и деформационных характеристик при температурно-скоростных условиях их прокатки на промышленных прокатных станах. К таким характеристикам, прежде всего, относится сопротивление пластической деформации. С сопротивлением стали пластическому деформированию прямую линейную взаимосвязь имеет усилие прокатки, а следовательно от сопротивления деформации напрямую зависят нагрузки на оборудование прокатной клетки. Имеющиеся данные свидетельствуют, что существующие аналитические методики расчета сопротивления деформации [127, 128] сталей при их известном химическом составе имеют существенную погрешность [129]. Поэтому широкое распространение, в особенности применительно к сталям нового химического состава, получили экспериментальные исследования данной характеристики деформируемости стали [130-136].

В рамках данной работы сопротивление пластической деформации экспериментальных сталей (таблица 3.2) исследовалась с помощью установки для горячего кручения образцов (рисунок 3.6).

В состав установки входят два вала, один из которых является неподвижным, а второй приводится в движение электродвигателем; при этом оба вала расположены внутри печи сопротивления. В валах выполнены пазы, в которых образцы фиксируются перед проведением испытаний; соответственно образцы цилиндрической формы имеют головки на обоих концевых участках.



а



б

- 1 – трансформатор; 2 – печь сопротивления; 3 – стопорный винт;  
 4 – корпус неподвижного вала; 5 – устройство для фиксации количества оборотов;  
 6 – силовые нагреватели; 7 – подвижный вал; 8 – уплотнение;  
 9 – неподвижный вал; 10 – винт-гайка; 11 – стальной образец;  
 12 – электродвигатель; 13 – размыкающий контакт; 14 – груз

Рисунок 3.6 – Лабораторная установка горячего кручения образцов:  
 а – общий вид; б – схема установки

После фиксации образца производится его нагрев до заданной температуры (рисунок 3.7) с последующим испытанием на кручение за счет вращения подвижного вала.

Адекватность результатов определения сопротивления пластической деформации с помощью указанной установки подтверждена ранее проведенными исследованиями сопротивления деформации рельсовых сталей широкого сортамента [137].

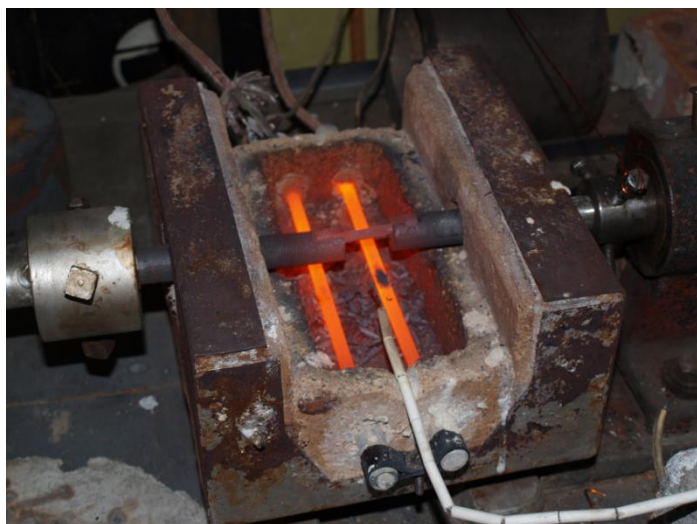


Рисунок 3.7 – Общий вид размещения образца в печи сопротивления установки для горячего кручения

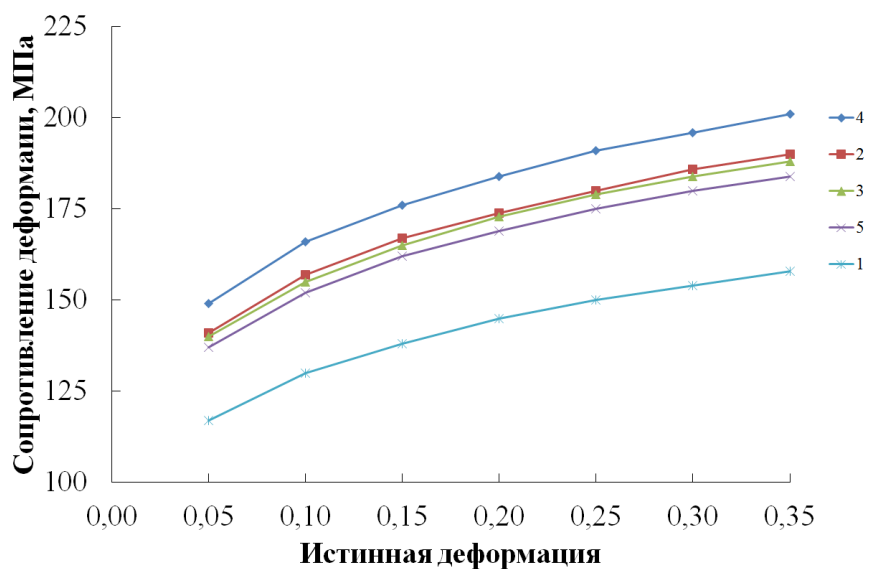
Имеющийся в составе установки блок программного управления позволяет получать информацию о накопленной степени деформации, используемой при определении сопротивления пластической деформации:

$$\sigma = \frac{12\sqrt{3}}{\pi \cdot d_0^3} M, \quad (3.1)$$

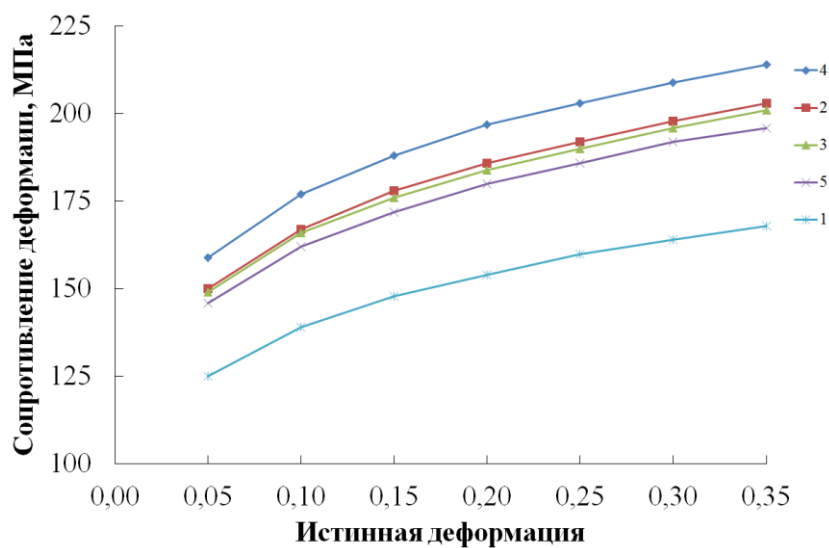
где  $d_0$  – диаметр образца до испытания;  $M$  – крутящий момент при конкретном значении накопленной степени деформации, Н·м.

При выборе интервала варьирования параметров деформации исходили из охвата диапазона изменения степени, температуры и скорости деформации, характерных для условий прокатки мелющих шаров и заготовок для их получения в условиях промышленного производства. Интервал изменения истинной деформации составил от 0,05 до 0,35 с шагом 0,05, температуры деформации – от 900°C до 1200°C с шагом 50°C; скорость деформации принимала значения 1, 5 и 10 с<sup>-1</sup>.

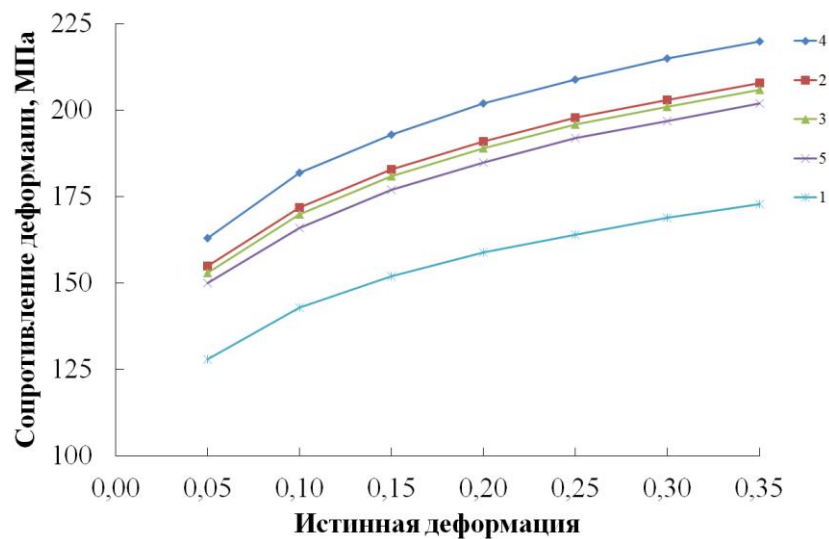
Полученные экспериментальным путем кривые течения [138, 139], примеры которых для минимальной и максимальной температур прокатки в рамках выбранного интервала представлены на рисунках 3.8 и 3.9, свидетельствуют об аналогичном характере зависимостей сопротивления деформации всех рассматриваемых вариантов сталей от параметров деформации.



а

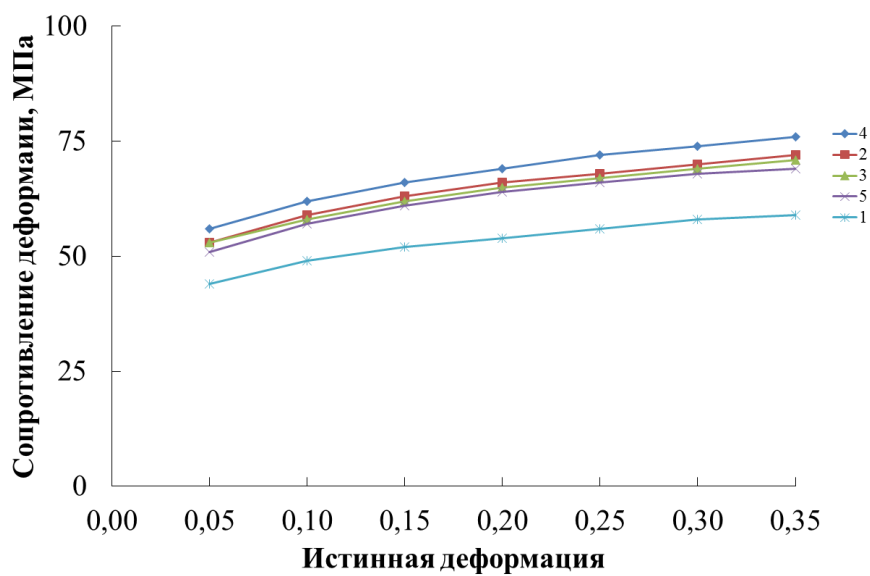


б

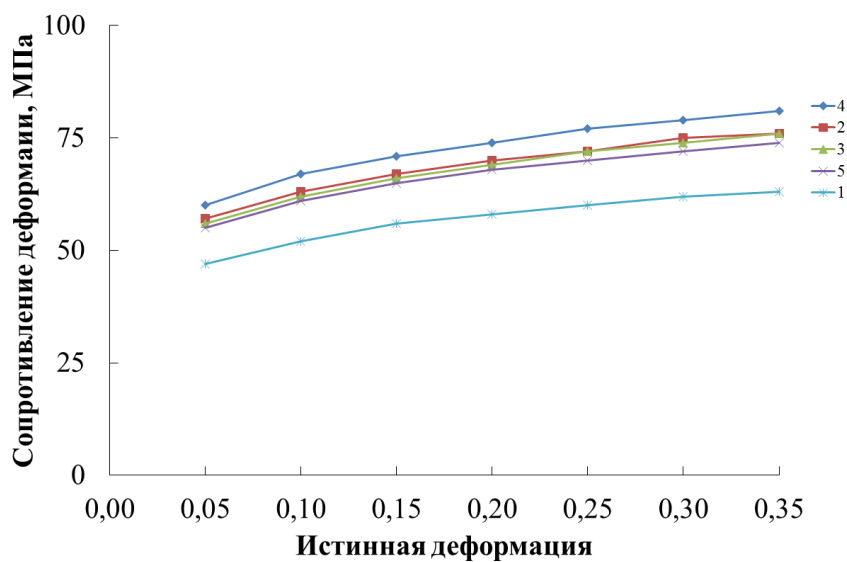


в

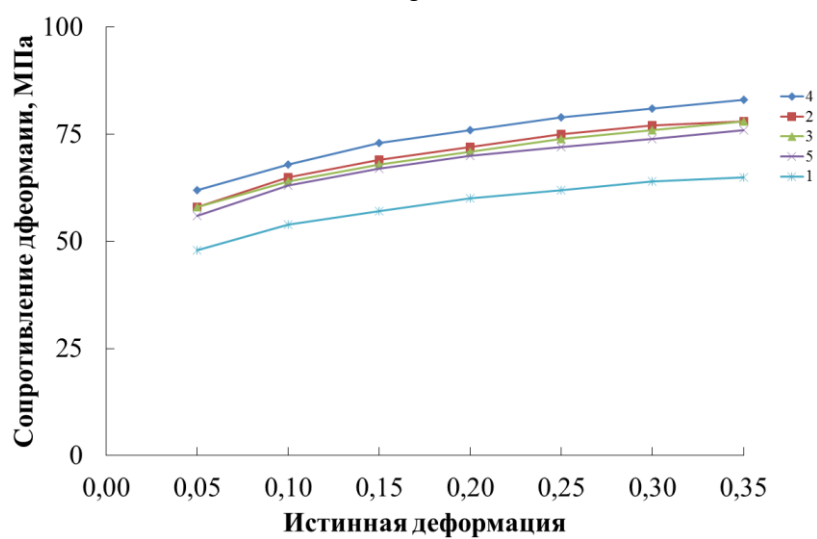
Рисунок 3.8 – Зависимость сопротивления экспериментальных сталей пластическому деформированию от степени деформации при температуре деформации  $900^{\circ}\text{C}$  и скорости деформации  $1 \text{ s}^{-1}$  (а),  $5 \text{ s}^{-1}$  (б) и  $10 \text{ s}^{-1}$  (в)



а



б



в

Рисунок 3.9 – Зависимость сопротивления экспериментальных сталей пластическому деформированию от степени деформации при температуре деформации  $1200^{\circ}\text{C}$  и скорости деформации  $1 \text{ s}^{-1}$  (а),  $5 \text{ s}^{-1}$  (б) и  $10 \text{ s}^{-1}$  (в)

Установлено, что увеличение истинной деформации в рассматриваемом интервале изменения данного параметра приводит к повышению сопротивления деформации всех сталей по нелинейному закону. Наиболее выраженное увеличение сопротивления деформации сталей наблюдается при росте истинной деформации с 0,05 до 0,10; дальнейшее увеличение истинной деформации приводит к менее интенсивному повышению сопротивления сталей деформированию. Определено, что повышение скорости деформации и, в особенности, снижение температуры деформации, приводит к значимому увеличению сопротивления сталей деформированию при аналогичных значениях истинной деформации. Так повышение скорости деформации с 1 до 10 с<sup>-1</sup> обуславливает увеличение сопротивления деформации сталей в среднем в 1,1 раза при аналогичных значениях степени и температуры деформации, а увеличение температуры деформации с 900°С до 1200°С увеличивает сопротивление сталей деформированию в 2,6-2,7 раза при аналогичных степени и скорости их деформации.

Обобщение полученных результатов экспериментальных исследований позволило выявить ряд закономерностей влияния содержания углерода и легирующих элементов в сталях на их сопротивление пластическому деформированию. Определено, что увеличение содержания углерода, марганца, хром и никеля в сталях оказывает значимое влияние на повышение их сопротивления пластическому деформированию:

$$\sigma_s = (4032[C] + 336[Mn] + 546[Cr] + 364[Ni]) \cdot e^{-3,255\left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,153} \cdot u^{0,004}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации стали, МПа;

[C], [Mn], [Cr], [Ni] – содержание углерода, марганца, хрома и никеля в стали соответственно, %;

t – температура прокатки, °С;

$\varepsilon$  – истинная деформация; u – скорость деформации, с<sup>-1</sup>.

Полученные закономерности влияния химического состава сталей на их

деформируемость качественно согласуются с общепринятыми представлениями и данными других исследователей, но имеют некоторую новизну в аспекте количественного влияния содержания отдельных элементов в сталях на их сопротивление деформации.

По полученным данным заметно более низким сопротивлением деформации по отношению к остальным сталям обладает сталь варианта №1 (рисунки 3.8, 3.9), отличительной особенностью которой является пониженное содержание хрома относительно всех других вариантов рассматриваемых экспериментальных сталей и пониженное содержание никеля относительно всех вариантов химического состава кроме варианта №3 (таблица 3.2). Отсюда можно сделать вывод о значительном влиянии повышения содержания хрома и никеля в сталях на увеличение их сопротивления деформированию. Этот вывод также подтверждается тем, что наибольшим из рассматриваемых сталей сопротивлением деформации обладает сталь варианта химического состава №4, для которой характерно самое высокое содержание хрома и никеля. Согласно имеющимся литературным данным [68, 140-142] хром и никель действительно увеличивают сопротивление деформации сталей, однако их влияние является заметным только при значительной концентрации данных элементов в высоколегированной сталях (на уровне 13-28%). В данном же случае речь идет о варьировании содержания хрома в пределах от 0,4% до 1,7% и никеля, начиная от концентрации в виде остаточной примеси (до 0,2%) до содержания порядка 0,9%.

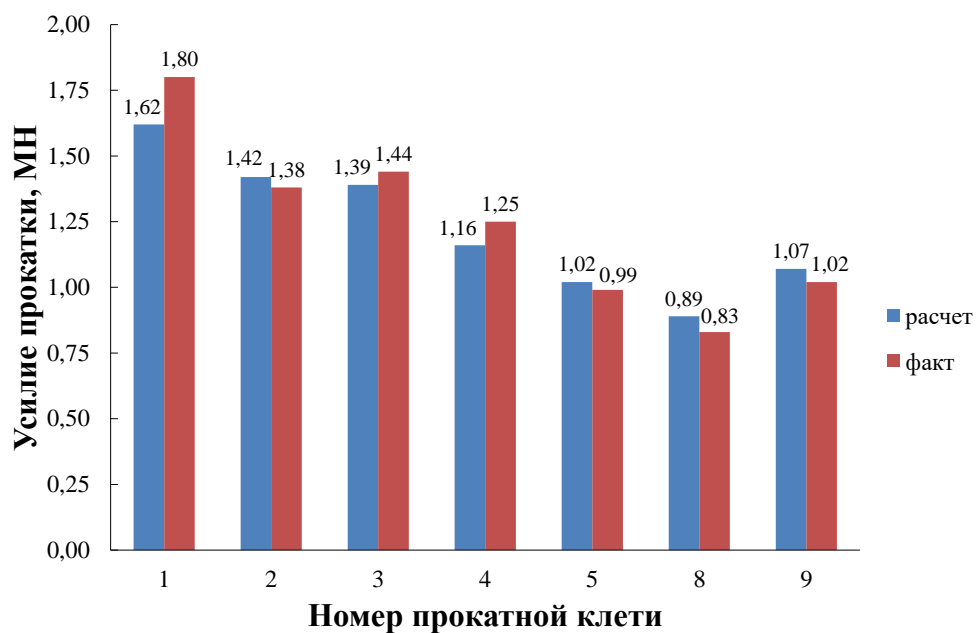
При анализе полученных кривых течения (рисунки 3.8, 3.9) обращает на себя внимание, что сопротивление деформации стали №3 имеет близкие значения к сопротивлению деформированию сталей №2 и №5 несмотря на то, что содержание углерода в данной стали заметно выше (таблица 3.2), а углерод согласно общепринятым представлениям является элементом, оказывающим наибольшее влияние на сопротивление деформации сталей [68, 140-142]. В данном случае, очевидно, влияние повышенного содержания углерода в стали №3 на ее сопротивление деформации было компенсировано влиянием более низкого содержанием хрома и никеля в данной стали (таблица 3.2). То есть на данном

примере также подтверждается сделанный ранее вывод о значительном влиянии повышенной концентрации хрома и никеля на увеличение сопротивления деформации сталей.

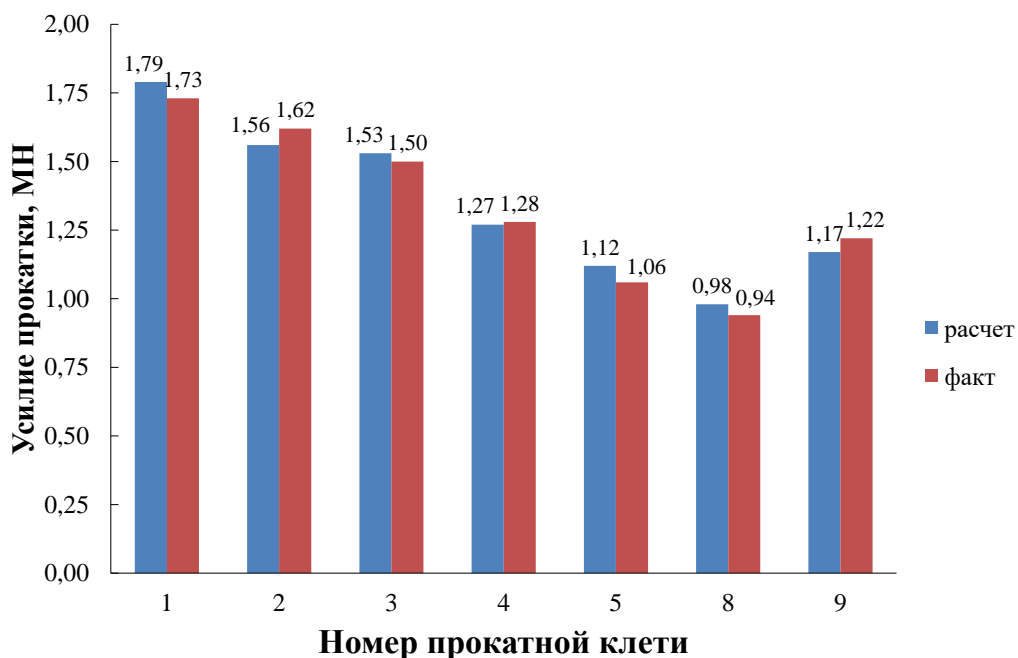
Влияние содержания марганца в сталях на их сопротивление деформации не просматривается при анализе кривых течения (рисунки 3.8, 3.9) в столь явном виде, как влияние хрома и никеля. Однако значимое влияние повышение содержания данного элемента в стали на увеличение их сопротивления деформированию установлено по результатам регрессионного анализа (уравнение 3.2). Это объясняется тем фактом, что кривые течения построены на основании средних значений сопротивления деформации для конкретных сочетаний термомеханических параметров деформации, а уравнение регрессии учитывает разброс значений сопротивления деформации при всех вариантах таких сочетаний.

С целью проверки адекватности полученного уравнения регрессии (3.2), устанавливающего зависимость сопротивления деформации сталей от их химического состава и параметров деформации, проведено сравнение фактического усилия прокатки и усилия прокатки, полученного расчетным методом при производстве шаровых заготовок диаметром 60 мм из сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 на непрерывном среднесортном стане «450». Результаты анализа свидетельствуют, что отклонения расчетных от фактических данных не превысили 10 % для обеих рассматриваемых марок стали (рисунок 3.10).

Таким образом, аналитическую зависимость сопротивления деформации сталей от их химического состава и параметров деформации возможно использовать при разработке и совершенствовании режимов прокатки, как мелющих шаров, так и исходных заготовок для широкого номенклатурного ряда марок стали.



а



б

Рисунок 3.10 – Усилие прокатки при производстве шаровых заготовок на непрерывном среднесортном стане «450» из стали Ш2.1 (а) и Ш2.3 (б)

### 3.3 Выводы

1. На основании комплекса аналитических и лабораторных экспериментальных исследований установлена принципиальная возможность производства мелющих шаров высокой поверхностной и нормируемой объемной

твердости (5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015) из сталей опытного химического состава, микролегированных ванадием при варьировании содержания в них углерода, марганца, хрома и никеля в широких пределах.

2. Определены закономерности влияния химического состава экспериментальных шаровых сталей, легированных ванадием, и параметров их деформации на сопротивление пластическому деформированию, в том числе:

- установлено, что повышение содержания углерода и марганца с 0,72% до 0,85% для обоих химических элементов, хрома с 0,38% до 1,71% и никеля от 0,08% до 0,87% обуславливает значимое увеличение сопротивления сталей деформированию вне зависимости от степени и скорости их деформации;

- определено, что увеличении истинной деформации в интервале с 0,05 до 0,35, скорости деформации с 1 до 10 с<sup>-1</sup>, а также снижение температуры деформации с 1200°С до 900°С приводит к повышению сопротивления сталей пластическому деформированию вне зависимости от их химического состава.

Полученные закономерности влияния химического состава и параметров деформации сталей на их сопротивление пластическому деформированию обобщены в виде аналитического уравнения, адекватность которого подтверждена для условий прокатки заготовок шаровых сталей на действующем промышленном прокатном стане, что свидетельствует о возможности применения указанной зависимости при разработке и совершенствовании режимов прокатки.

## **4 Разработка и опытно-промышленное опробование технологических режимов производства мелющих шаров высокой объемной твердости и ударостойкости**

### **4.1 Обоснование объекта и характеристика условий проведения промышленных исследований**

Согласно имеющимся литературных и производственных данных [4, 6, 8, 55] наибольшие трудности имеют место при организации производства шаров 5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015 – шаров высокой поверхностной и нормируемой объемной твердости. Обеспечение требуемых параметров твердости и одновременно высокой ударной стойкости мелющих шаров является объективно сложной задачей и требует применения комплексного подхода, связанного с оптимизацией технологических режимов на всех стадиях производства, начиная от производства заготовок и заканчивая финальной термической обработкой шаров.

На основании результатов экспериментальных исследований, отраженных в разделе 3.1 данной работы, показана принципиальная возможность обеспечения требований к мелющим шарам 5-ой группы твердости по ГОСТ 7524-2015 при их производстве из высокоуглеродистых доэвтектоидных сталей, легированных марганцем, хромом и ванадием, а также для ряда сталей – никелем.

Исходя из результатов проведенных исследований микроструктуры образцов опытных сталей (рисунки 3.3-3.5), показателей твердости по сечению образцов (таблица 3.4) и деформационных характеристик сталей в условиях, характерных для их горячей прокатки на промышленных станах (рисунки 3.8-3.9), наиболее целесообразным является применение для производства мелющих шаров 5 группы твердости экономнолегированной стали, химический состав которой близок варианту №1 таблицы 3.1. Фактически данный вариант состава стали, принятый к опытно-промышленному опробованию для производства

мелющих шаров, соответствует рельсовой стали 76ХФ с зауженным диапазоном содержания основных химических элементов и отличается от остальных рассмотренных вариантов пониженным содержанием дорогостоящих легирующих элементов; данная сталь условно промаркирована Ш76ХФ (таблица 4.1).

Также в качестве дополнительного варианта для опытно-промышленного опробования использована экспериментальная сталь, химического состава близкого к варианту №5 (таблица 3.1). Данная сталь, как и выбранная в качестве основной для опробования, согласно результатов лабораторных экспериментальных исследований (раздел 3.1) обладает оптимальным сочетанием качества микроструктуры (рисунки 3.3-3.5) и твердости (таблица 3.4) опытных образцов. Отличительной особенностью данной стали от стали Ш76ХФ является повышенное содержание хрома и наличие легирования никелем; в соответствии с ее химическим составом сталь промаркирована, как Ш76ХНФ (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Химический состав сталей для опытно-промышленного опробования производства мелющих шаров 5 группы твердости

Марка стали	Содержание химических элементов, %							
	С	Mn	Si	Cr	Ni	V	S	P
							не более	
Ш76ХФ	0,74-0,76	0,80-0,90	0,35-	0,40-0,50	-	0,03-0,05	0,015	0,015
Ш76ХНФ			0,45		0,40-0,50		0,015	0,015

Необходимо отметить, что технологическая схема производства мелющих шаров в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» различается в зависимости от профилеразмеров производимых шаров (рисунок 4.1). Для производства шаров диаметром 40-70 мм используются заготовки соответствующего диаметра, прокатанные на непрерывном среднесортном стане «450», а для производства шаров диаметром 80-100 мм – заготовки, прокатанные на рельсобалочном стане. Поэтому в ходе экспериментальных исследований проводили опытно-промышленное опробование производства мелющих шаров 5-ой группы твердости диаметрами

60 мм и 100 мм.

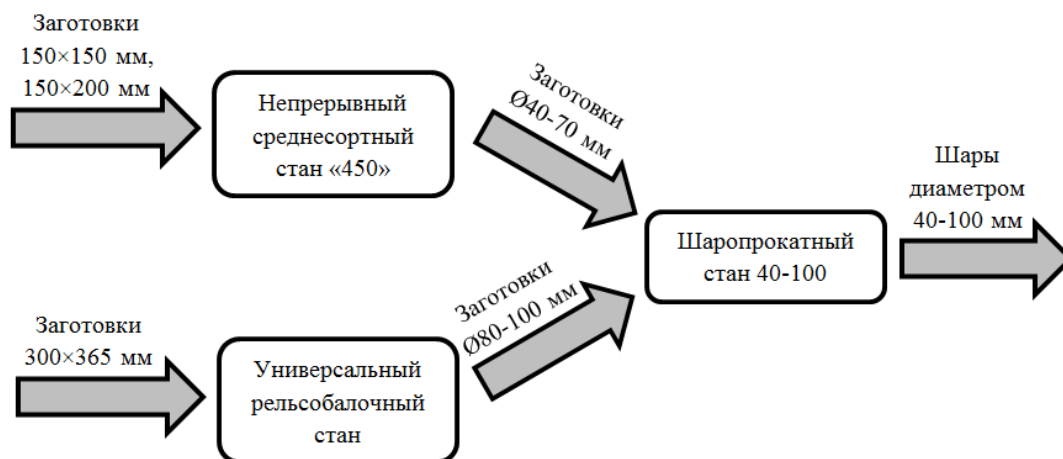


Рисунок 4.1 – Схемы производства заготовок и мелющих шаров в АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Сортамент непрерывного среднесортного стана «450», помимо шаровых заготовок диаметром 40-60 мм также включает в себя широкую номенклатурную линейку профилей: арматурный прокат №32-60, квадратную заготовку со стороной 30-53 мм, фасонный прокат.

Для нагрева исходных заготовок сечением 150×150 мм и 150×200 мм на стане «450» используются три нагревательные печи. Клетки стана объединены в две группы – черновую и чистовую. При этом черновая группа клеток состоит из трех подгрупп, в каждой из которых имеется по три клетки: крайние клетки с горизонтальным расположением валков, средняя (комбинированная) может работать с установкой валков, как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. Перед каждой трехклетевой непрерывной черновой группой имеются кантователи. Чистовая непрерывная группа состоит из семи клеток, которые различаются по конструктивному исполнению и расположению валков: имеются комбинированные, горизонтальные и универсальные клетки. Перед и после чистовой группой клеток установлены летучие ножницы. В состав оборудования стана также входят установка термоупрочнения, двухсторонний реечный холодильник, сортоправильные машины.

При производстве заготовок диаметром 60 мм на среднесортном стане «450» задействованы семь из девяти клеток черновой группы и четыре клетки

чистой группы. Прокатка в первом, третьем и четвертом проходах производится на гладкой бочке, во втором проходе – в ящичном калибре, с пятого по десятый проходы – по системе «ребровой овал - овал»; одиннадцатый проход является чистовым.

Основным сортаментом универсального рельсобалочного стана закономерно являются железнодорожные рельсы, при этом также прокатывают заготовки круглого сечения диаметром 80-120 мм и квадратные заготовки со стороной 120-150 мм. Основное оборудование стана включает в себя: нагревательную печь; две обжимные (черновые) реверсивные клетки; непрерывную группу клеток, в которой крайние клетки являются универсальными, а средняя – горизонтальной; отдельно расположенную чистовую универсальную клетку; пилы горячей резки для раскроя раскатов; холодильник; установку дифференцированного термоупрочнения рельсов.

Прокатка заготовок диаметром 100 мм на рельсобалочном стане производится за 13 проходов, из которых все кроме последнего производятся в черновых клетях, последний проход, соответственно производится в непрерывной группе клеток.

Основное оборудование шаропрокатного стана включает в себя: камерную нагревательную печь с шагающими балками, рабочую клетку с диаметром бочки валков 390-490 мм и длиной бочки 400 мм; ковшевой конвейер для подстуживания шаров; шнековый барабан для закалки шаров.

Описание технологии производства мелющих шаров на рассматриваемом прокатном стане представлено в разделе 2.1 данной работы.

При проведении исследований, представленных ниже, использованы данные об усилиях прокатки при производстве заготовок и мелющих шаров из различных, в том числе экспериментальных, сталей. Необходимо отметить, что на рельсобалочном стане усилия прокатки фиксируются в автоматическом режиме, а на стане «450» и шаропрокатном стане фиксируются только данные о силе тока на электродвигателях прокатных клеток. Поэтому для условий указанных станов усилия прокатки получены расчетным путем с учетом того факта, что для

конкретного электродвигателя прокатной клетки отношение усилия прокатки к силе тока в цепи якоря двигателя является постоянной величиной:  $P / I = \text{const}$ .

## 4.2 Исследование и совершенствование режимов прокатки мелющих шаров

Анализ усилий прокатки при опытно-промышленном опробовании производства заготовок диаметром 60 мм из экспериментальных сталей Ш76ХФ и Ш76ХНФ на стане «450» показал значимое увеличение данного параметра относительно стандартной шаровой стали Ш2.3, используемой для производства шаров рассматриваемого диаметра (рисунок 4.2). Фактически усилие прокатки при производстве заготовок из стали Ш76ХФ превышает данный показатель при производстве стали Ш2.3 в среднем в 1,39 раза, а для стали марки Ш76ХНФ превышение в среднем составляет 1,58 раза. Полученный результат, очевидно, обусловлен повышенным содержанием марганца, хрома и никеля в данных сталях, что ранее обосновано в разделе 3.2.

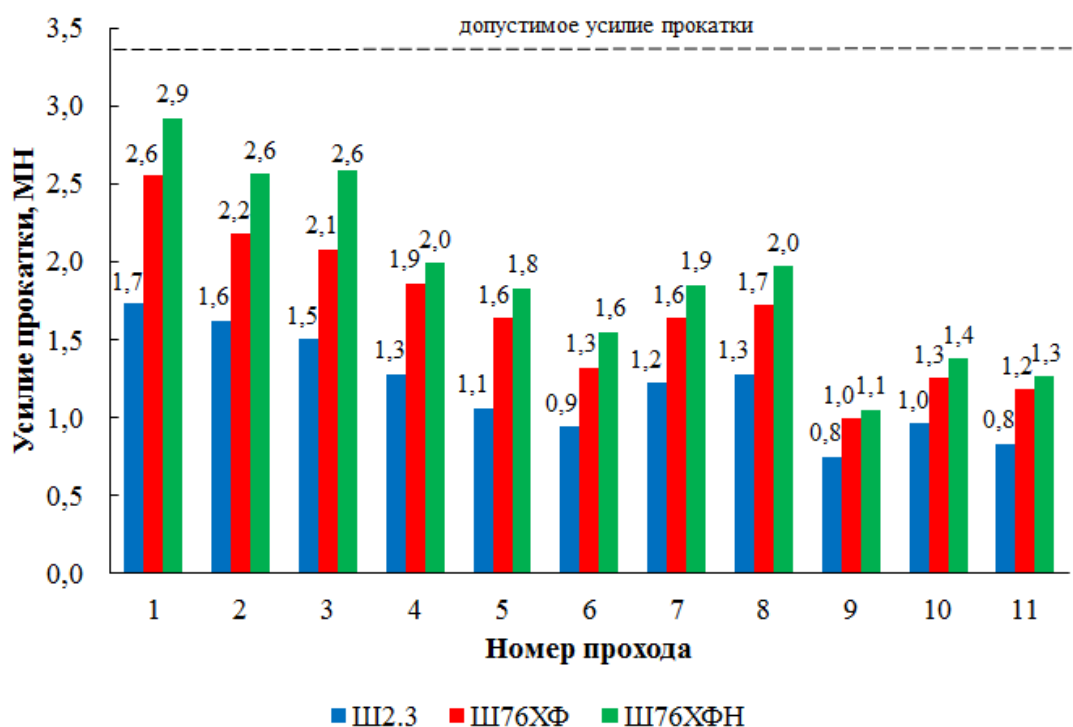


Рисунок 4.2 – Фактические усилия прокатки при производстве заготовок диаметром 60 мм на стане «450» из различных марок шаровых сталей

Также применительно к обеим рассматриваемым экспериментальным сталям (Ш76ХФ и Ш76ХНФ) установлено значимое (в среднем на 19-20%) отклонение фактических усилий прокатки в большую сторону от расчетных значений (рисунок 4.3), полученных с использованием прогнозных значений сопротивления деформации, определенных по аналитическому выражению (3.2).

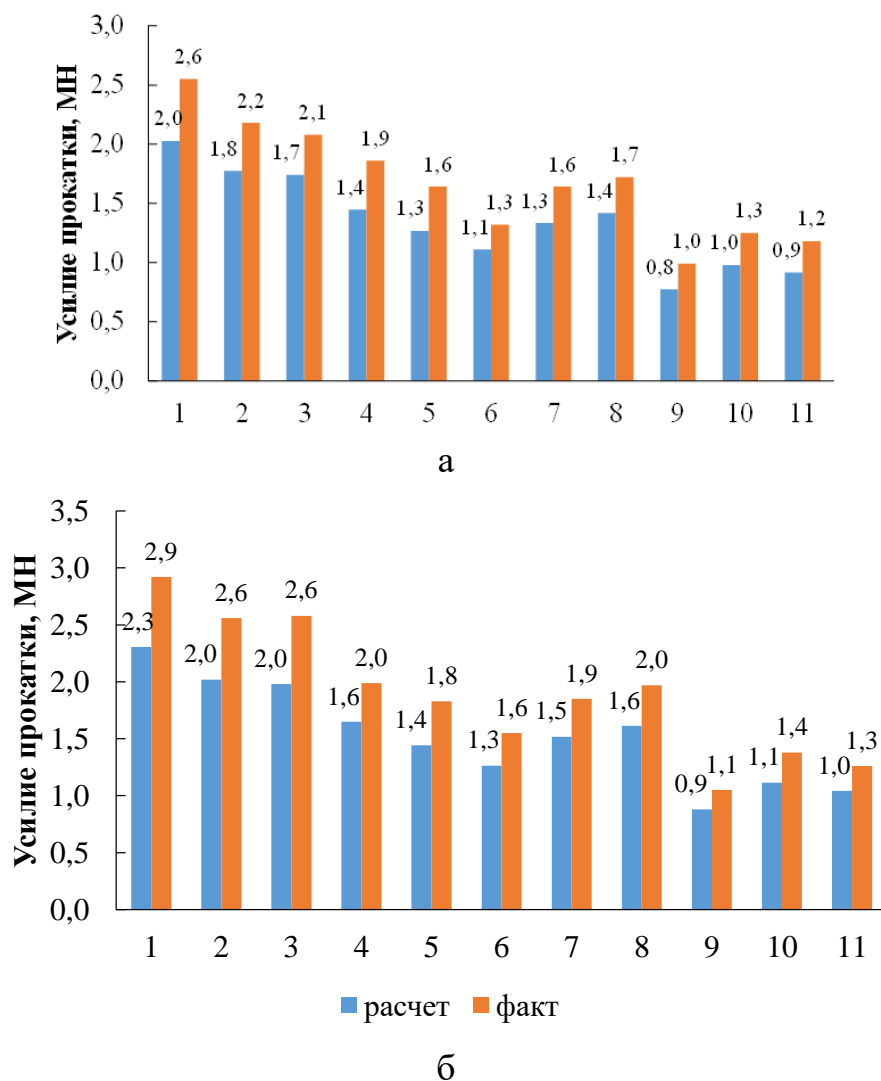


Рисунок 4.3 – Сравнительный анализ расчетных и фактических усилий прокатки при производстве заготовок диаметром 60 мм на стане «450» из стали Ш76ХФ (а) и Ш76ХНФ (б)

С учетом того, что используемая аналитическая зависимость (3.2), показала хорошую сходимость расчетных и фактических данных применительно к стандартным шаровым сталям Ш2.1 и Ш2.3 (рисунок 3.10) и, опираясь на результаты ранее проведенных исследований [137], можно сделать вывод, что выявленные отклонения фактических усилий прокатки от прогнозных расчетных

значений обусловлены влиянием легирования сталей ванадием. Как показано в диссертационном исследовании [137] повышение содержания ванадия при одновременном увеличении содержания азота значительно увеличивает сопротивление деформации сталей за счет формирования нитридов и карбонитридов ванадия.

В ходе лабораторных исследований, на основании результатов которых была получена аналитическая зависимость (3.2), значимое влияние ванадия на сопротивление деформации не установлено в связи с тем, что выплавка стали производилась в индукционной печи из особо чистых шихтовых материалов. Соответственно содержание азота в лабораторных слитках опытных сталей имело минимальные значения. В заготовках промышленного производства содержание азота составило от 0,004% до 0,012% и такая концентрация согласно имеющихся литературных данных [143] является достаточной для формирования нитридов и карбонитридов ванадия в стали, значительно повышающих сопротивление стали пластическому деформированию.

Опираясь на полученные результаты прокатки заготовок для мелющих шаров в производственных условиях в ранее полученную аналитическую зависимость сопротивления деформации сталей от их химического состава и параметров деформации (3.2) необходимо ввести дополнительный поправочный коэффициент; уравнение приобретет вид:

$$\sigma_s = K_v \cdot (4032[C] + 336[Mn] + 546[Cr] + 364[Ni]) \cdot e^{-3,255\left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,153} \cdot u^{0,004}, \quad (4.1)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации стали, МПа;  $K_v$  – коэффициент, учитывающий наличия микролегирования стали ванадием (при легировании стали ванадием до содержания 0,03-0,04% –  $K_v = 1,2$ ; при отсутствии легирования ванадием –  $K_v = 1$ );  $[C]$ ,  $[Mn]$ ,  $[Cr]$ ,  $[Ni]$  – содержание углерода, марганца, хрома и никеля в стали соответственно, %;  $t$  – температура прокатки, °С;  $\varepsilon$  – истинная деформация;  $u$  – скорость деформации,  $s^{-1}$ .

Металлографические исследования заготовок показали наличие практически однородной микроструктуры по их сечению. Как в

приповерхностной, так и в осевой зонах заготовок сталей Ш76ХФ и Ш76ХНФ структура представляет собой пластинчатый перлит при минимальном количестве феррита (рисунок 4.4). Размер зерен соответствует №5 и №4 по ГОСТ 5639-82, при этом приповерхностный слой характеризуется незначительно более мелкозернистой структурой (рисунок 4.4 а) по отношению к центральной области заготовок (рисунок 4.4 б). Согласно полученным данным различие твердости по сечению заготовок является минимальным, твердость находится в пределах 262-286 НВ.

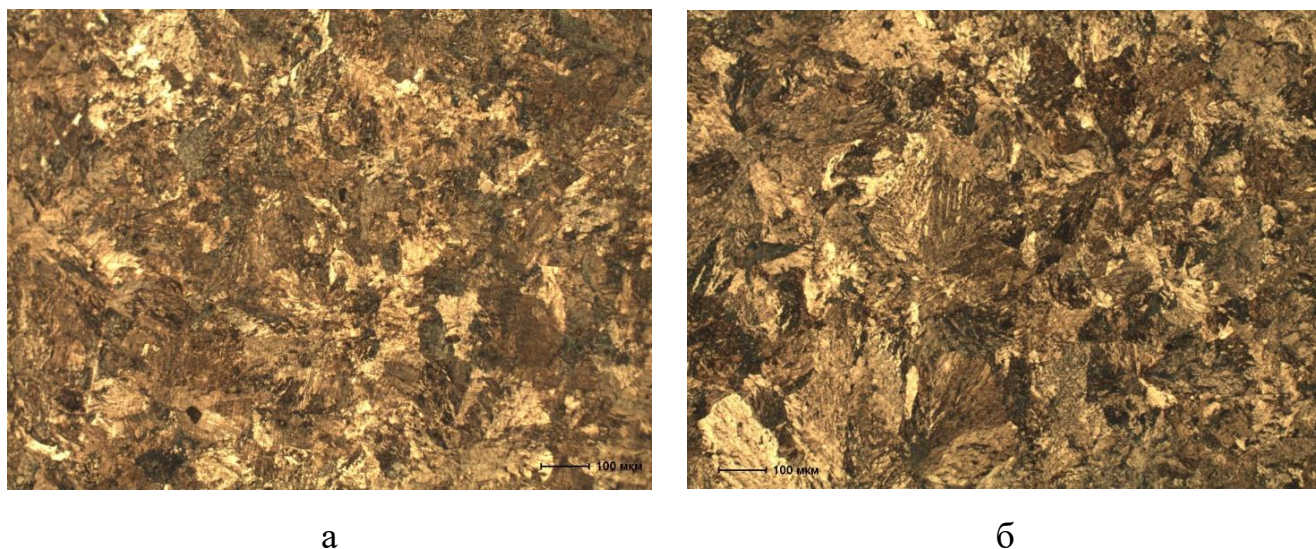


Рисунок 4.4 – Микроструктура приповерхностного слоя (а) и осевой зоны (б) заготовок диаметром 60 мм из сталей Ш76ХФ и Ш76ХНФ

Результаты прокатки заготовок диаметром 100 мм на рельсобалочном стане позволили определить закономерности изменения усилий прокатки аналогичные приведенным выше закономерностям для прокатки заготовок диаметром 60 мм на стане «450». Выявлено значительное повышение усилий прокатки при производстве заготовок из экспериментальных сталей, дополнительно легированных ванадием, относительно прокатки заготовок из стандартной шаровой стали (рисунок 4.5), составившее 1,4 и 1,6 раза для сталей Ш76ХФ и Ш76ХНФ соответственно. Это дополнительно свидетельствует о правомерности сделанным выше выводов о влиянии легирования ванадием на увеличение сопротивления сталей пластическому деформированию.

Анализ микроструктуры, степени развития химической неоднородности и

распределения твердости по сечению заготовок диаметром 100 мм, прокатанных на рельсобалочном стане, показал, что данные параметры качества заготовок находятся на том же уровне, что и параметры качества заготовок диаметром 60 мм, полученных на стане «450».

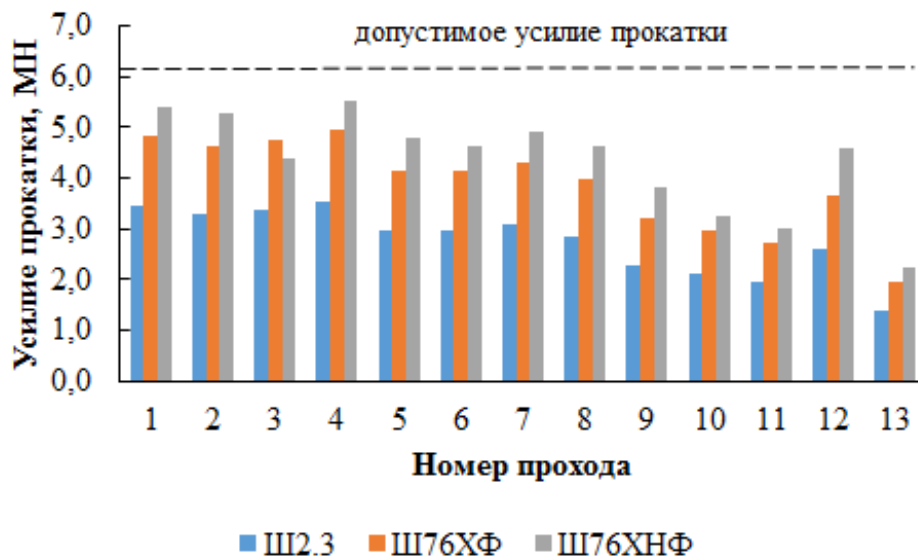


Рисунок 4.5 – Фактические усилия прокатки при производстве заготовок диаметром 100 мм для мелющих шаров на рельсобалочном стане

При определении режимов опытно-промышленного производства мелющих шаров из экспериментальных сталей руководствовались результатами моделирования напряженного состояния металла в процессе поперечно-винтовой прокатки, моделирования распределения температурных полей по поверхности шаров в процессе их прокатки и охлаждения, представленными в главе 2. Температуру нагрева заготовок экспериментальных сталей под прокатку принимали на верхнем пределе допустимого интервала для заготовок стандартного химического состава с учетом повышенного сопротивления деформации экспериментальных сталей (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Температурные режимы прокатки мелющих шаров

Диаметр шара, мм	Температура выдачи заготовок из нагревательной печи, °С	
	стандартные стали	экспериментальные стали
60	880-1000	1000±20
100	950-1050	1050±20

Согласно полученным результатам опытной прокатки мелющих шаров усилие прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 60 мм из рассматриваемых сталей экспериментального состава составляют 72-81% от допустимого значения, а при производстве шаров диаметром 100 мм – 86-98% (рисунок 4.6).

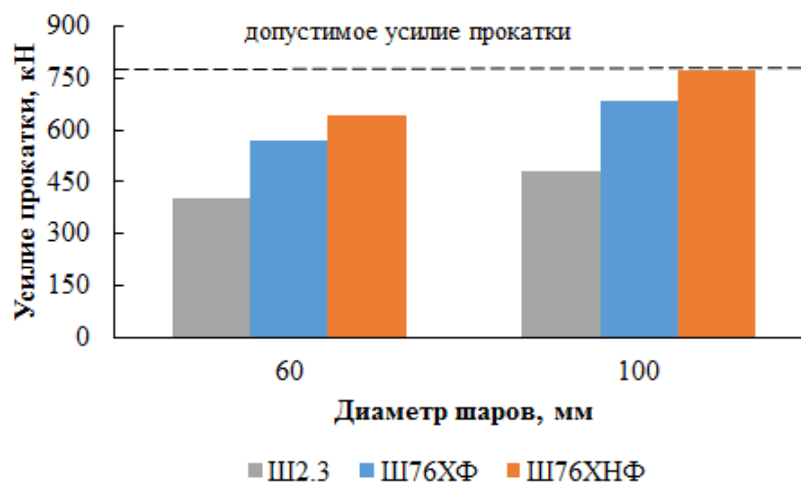


Рисунок 4.6 – Фактические усилия прокатки при производстве мелющих шаров из различных марок стали

Приведенные данные свидетельствуют о нецелесообразности применения стали Ш76ХНФ для прокатки шаров большого диаметра.

С учетом значительно повышения усилия прокатки при производстве шаров из экспериментальных сталей по сравнению с применением стали стандартных марок с целью уменьшения износа прокатных валков обоснованным является развитие направления по совершенствованию калибровки валков. Как показано в ходе моделирования напряженного состояния по поверхности шаров (рисунок 2.6) в процессе их прокатки возникают значительные по величине напряжения, достигающие значительных величин в зонах врезки реборды в исходную заготовку и зонах повторной врезки реборды в тело заготовки после оборотов валков, что закономерно способствует повышенному износу реборд. При этом метод снижения интенсивности указанных напряжений за счет повышения температуры деформации в данном случае неприменим, так как повышение температуры прокатки сверх принятого (таблица 4.2) ограничено техническими возможностями оборудования прокатного стана.

Характеризуя существующую калибровку валков рассматриваемого прокатного стана можно выделить следующие основные моменты (таблица 4.3): в зависимости от диаметра прокатываемых мелющих шаров применяются, как одно-, так и многозаходные валки; применяется калибровка с дискретно изменяющимся шагом нарезки реборд; угол наклона валков при прокатке шаров различного диаметра варьируется незначительно.

Таблица 4.3 – Параметры валков шаропркатного стана 40-100

Диаметр шара, мм	Количество заходов	Тип нарезки калибров	Количество переточек	Угол наклона валков, °
40	4	правый	2	1,5 - 2
50	3		2	1,5 - 2
60	2		1	2 - 3
70	1		1	2 - 3
80	1		1	1,5 - 2
90	1		0	2 - 2,5
100	1		0	2 - 2,5

При проектировании новой калибровки для прокатки шаров диаметром 100 мм использовали методику [45, 46], подробно представленную в разделе 1.2 данной работы. Результаты расчетов параметров калибровки представлены в таблицах 4.4-4.6.

Таблица 4.4 – Результаты предварительного этапа расчетов параметров калибровки для прокатки шаров диаметром 100 мм

Угол поворота валков ( $\alpha$ ), °	Высота реборды ( $h_a$ ), мм	Радиус перемычки ( $r_a$ ), мм	Ширина сферического участка калибра ( $C_a$ ), мм	Ширина реборды валков ( $a_a$ ), мм	Объем металла, мм <sup>3</sup>			
					в сферической части ( $V_{Ca}$ )	в перемычках ( $V_{aa}$ )	за исключением цилиндрической части ( $\Sigma(V_{\alpha-360}^a)$ )	в цилиндрической части калибра ( $V_{Sa}$ )
1260	4,4	47,8	20,47	4,8	164849	34437	477315	-
1170	11,9	40,3	32,86	4,7	241873	23968	549290	-
1080	19,4	32,8	40,35	4,4	273835	14864	575706	-
990	26,9	25,3	45,43	3,4	287589	6834	585456	-
900	34,4	17,8	48,86	5,0	292761	4974	589708	116338
810	41,9	10,3	50,97	7,6	294167	2532	-	41921
720	49,4	2,8	51,92	8,2	294338	202	-	13174
630	49,4	2,8	51,92	9,1	-	-	-	3447
540	49,4	2,8	51,92	9,9	-	-	-	-786

Таблица 4.5 – Результаты основного этапа расчетов параметров калибровки для прокатки шаров диаметром 100 мм

Угол поворота валков ( $\alpha$ ), °	Величина для проверки ширины реборды ( $b_\alpha$ ), мм	Ширина цилиндрической части калибра ( $S_\alpha$ ), мм	Ширина реборды валков ( $a_\alpha$ ), мм	Шаг нарезки калибра ( $t_\alpha$ ), мм
1260	-	-	4,8	13,8
1170	-23,5	-	4,7	53,8
1080	-11,8	-	4,4	75,9
990	-6,3	-	3,4	94,4
900	-3,5	13,7	1,1	77,4
810	3,5	14,9	5,6	99,0
720	-	1,6	7,1	107,9
630	-	0,4	8,2	110,5
540	-	-0,1	8,7	112,9

Таблица 4.6 – Параметры калибровки валков для прокатки шаров диаметром 100 мм после корректировки

Угол поворота валков ( $\alpha$ ), °	Ширина цилиндрической части калибра ( $S_\alpha$ ), мм	Ширина реборды валков ( $a_\alpha$ ), мм	Объем металла, мм <sup>3</sup>		
			в перемычках ( $V_{\alpha\alpha}$ )	в цилиндрической части калибра ( $V_{S\alpha}$ )	за исключением цилиндрической части ( $\Sigma(V_{\alpha-360^\alpha})$ )
1260	66,75	4,83	34437	-	475365
1170	42,08	4,71	23968	-	548961
1080	27,40	4,44	14864	-	575693
990	18,24	3,42	6834	-	585446
900	13,70	1,08	1075	116338	587744
810	4,94	5,62	1873	41921	295104
720	1,55	7,10	175	13174	294426
630	0,41	8,24	203	3447	-
540	-0,09	8,74	215	0	-

Согласно разработанной калибровке шары диаметром 100 мм прокатываются за 3,5 оборота валков (поворот валков составляет 1260°), из которых 2 оборота валков (720°) составляет отделочный участок и 1,5 оборота валков (540°) – формирующий участок.

График, иллюстрирующий изменение высоты реборды представлен на рисунке 4.7.

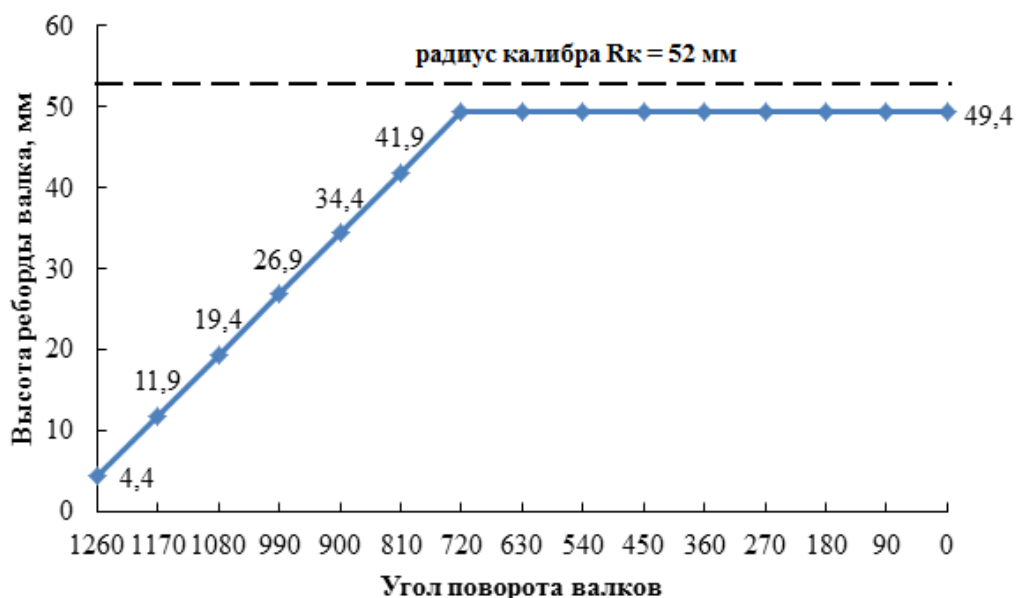


Рисунок 4.7 – Схема нарезки калибров для прокатки шаров диаметром 100 мм

Моделирование процесса прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм, проведенное в программном комплексе DEFORM, показало, что использование новой калибровки позволяет уменьшить величину максимальных напряжений в зонах внедрения реборды в заготовку в 1,14-1,23 при производстве шаров из стали Ш76ХФ (рисунок 4.8). При этом напряжения, возникающие при прокатке шаров из стали Ш76ХФ по новой калибровке, незначительно выше напряжений при прокатке шаров из стандартной стали Ш2.Л, применяемой для производства шаров диаметром 100 мм 4-й группы твердости, по существующей калибровке (рисунок 4.8).

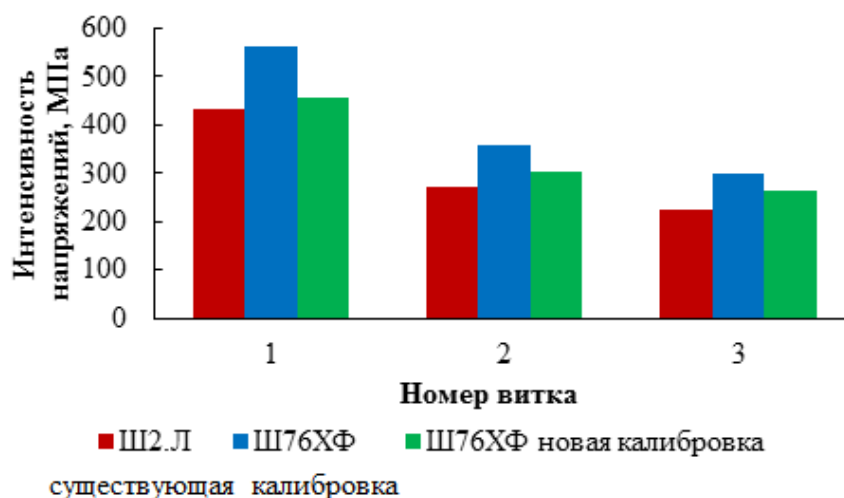


Рисунок 4.8 – Интенсивность напряжений при прокатке шаров диаметром 100 мм с использованием различных калибровок

Эффективность калибровки с точки зрения снижения износа реборд прокатных валков подтверждена результатами компаний прокатки мелющих шаров (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Удельный расход прокатных валков для прокатки шаров диаметром 100 мм

Марка стали	Удельный расход валков, кг/т		Отклонение	
	существующая калибровка	новая калибровка	абс., кг/т	отн., %
Ш2.Л	0,72	0,56	-0,18	-22
Ш76ХФ	0,97	0,80	-0,17	-18

По полученным данным удельный расход валков для прокатки шаров диаметром 100 мм 4-й группы твердости из стали Ш2.Л снижен на 22%, а при прокатке шаров аналогичного диаметра из стали Ш76ХФ – уменьшен на 18%.

### **4.3 Исследования качества мелющих шаров и обоснование направлений совершенствования режимов их термической обработки**

При проведении промышленных исследований для термообработки шаров из экспериментальных сталей использовали режимы термической обработки, принятые на рассматриваемом прокатном стане для стандартных сталей (таблица 2.2).

По полученным данным поверхностная и объемная твердость 24% шаров диаметром 60 мм и 31% диаметром 100 мм не соответствует требованиям 5-ой группы твердости.

Металлографическими исследованиями таких шаров диаметром 60 мм установлено, что их микроструктура включает в себя три зоны: поверхностный слой глубиной 15-18 мм, переходную зону толщиной 2-4 мм и сердцевину. При этом поверхностный слой имеет однородную микроструктуру в виде мартенсита + карбиды (рисунок 4.9 а) с твердостью 56-57 HRC, а в переходной зоне и

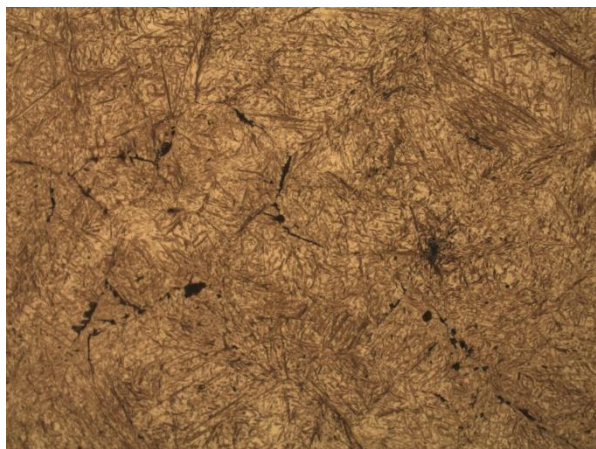
сердцевине шаров помимо указанных составляющих выявляется также троостит в виде сетки по границам зерен в (рисунки 4.9 б, в) и дополнительно обнаруживаются небольшие участки троостита сфероидального в сердцевине (рисунок 4.9 в). Это обуславливает пониженную твердость металла в данных зонах, составляющую 48-52 HRC. Величина зерна по сечению шара значительно не отличается и соответствует №4 и №5 по ГОСТ 5639-82.



а



б



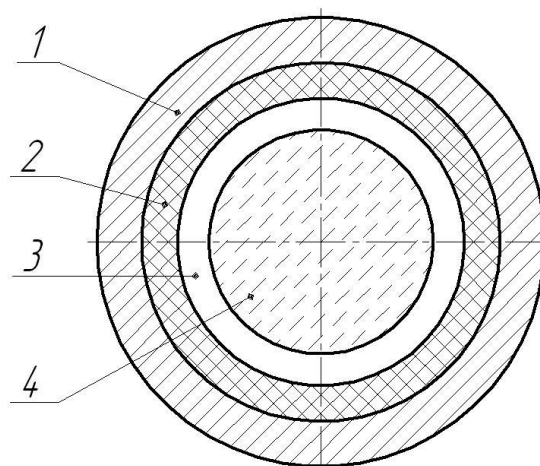
в

Рисунок 4.9 – Микроструктура мелющих шаров диаметром 100 мм из сталей Ш76ХФ и Ш76ХФН после термообработки в поверхностном слое (а), переходной зоне (б) и сердцевине (в)

Исследованиями микроструктуры шаров диаметром 100 мм с пониженной твердостью определено, что они имеют четырехзонное строение: (рисунок 4.10): поверхностный слой (1); первая переходная зона (2); вторая переходная зона (3); сердцевина (4).

Поверхностная зона распространяется на глубину 7-9 мм, толщина первой и

второй переходных зон составляет 8-10 мм и 7-9 мм соответственно. Поверхностная и первая переходная зона шаров диаметром 100 мм имеет структуру и твердость аналогичную исследованным шарам диаметром 60 мм.



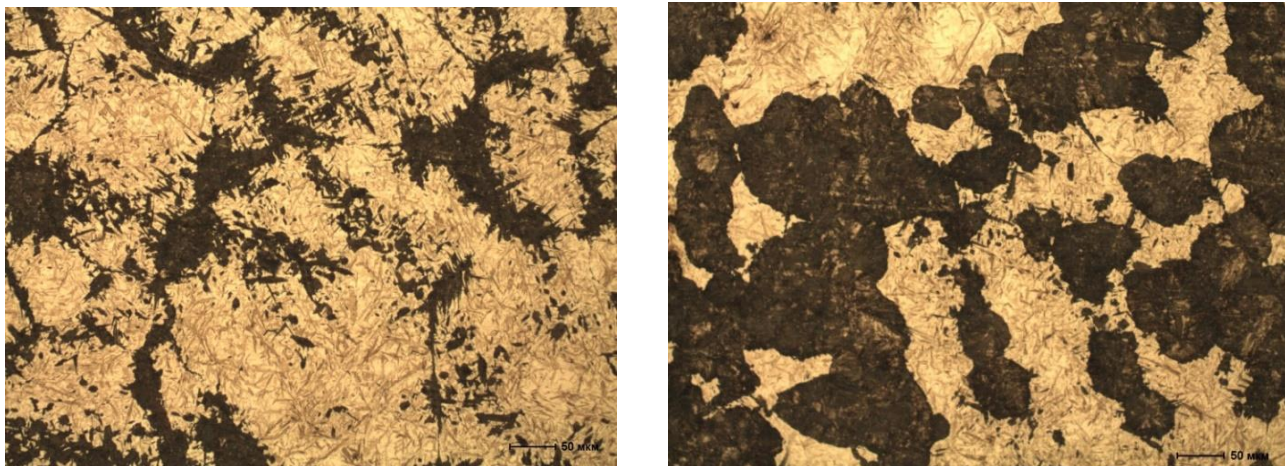
1 – поверхностная зона;

2, 3 – первая и вторая переходные зоны соответственно; 4 – сердцевина  
Рисунок 4.10 – Схема формирования зон в исследуемых шарах Ø 100 после термообработки

Отличительной особенностью структуры второй переходной зоны является наличие широкой трооститной сетки в дополнении к мартенситу и карбидам (рисунок 4.11 а), что обуславливает более низкую твердость металл в данной зоне – 44-51 HRC. В микроструктуре сердцевины шаров диаметром 100 мм явно преобладает троостит сфероидальный и имеется некоторое количество мартенсита с карбидами (рисунок 4.11 б), твердость находится в диапазоне 36-44 HRC. Наличие в микроструктуре термообработанных шаров троостита, свидетельствует о низкой скорости охлаждения при закалке, то есть о недостаточной охлаждающей способности закалочной среды. При этом исходя из результатов металлографических исследований особенно сильно эффект пониженной скорости охлаждения выражен применительно к сердцевине шаров повышенного диаметра.

Согласно существующей технологии термоупрочнения шаров в условиях рассматриваемого прокатного стана закалка происходит к шнековом барабане путем подачи воды, температура которой регламентирована в пределах не более 40°C. В ходе проведения экспериментальных исследований температура воды для

различных партий шаров находилась в пределах 18-39°C. При этом все шары с выявленной дефектной микроструктурой и пониженной твердостью производились в партиях с температурой охлаждения, близкой к верхней границе рассматриваемого интервала.



а

б

Рисунок 4.11 – Микроструктура второй переходной зоны (а) и сердцевины (б) мелющих шаров диаметром 100 мм из сталей Ш76ХФ и Ш76ХФН после термообработки

По результатам копровых испытаний мелющих шаров установлено, что отбраковка на партиях шаров, при закалке которых температура охлаждающей воды составляла более 30°C, в среднем на 3,6% выше по отношению к шарам с температурой закалочной воды 18-30°C. Данный факт, очевидно, объясняется вышеприведенными особенностями микроструктуры шаров, при закалке которых использовалась вода с повышенной температурой – двухфазная структура мартенсит + троостит обладает меньшей устойчивостью к ударным нагрузкам по отношению к однородной мартенситной структуре. Из-за значительного различия в твердости троостита и мартенсита разрушение происходит по границе раздела указанных фаз, что подтверждается выявленными микротрещинами (рисунок 4.12).

Имеющиеся литературные данные однозначно свидетельствуют, что повышение температуры воды значительно снижает ее охлаждающую способность, что особенно сильно проявляется в периоде закалки, называемом «пузырьковое кипение» [121]. Указанный период наступает при полном разрушении «паровой

рубашки», образующейся на поверхности стали в начальный период охлаждения и характеризуется максимальным отводом тепла. По данным работы [121] увеличение температуры воды на 20°С снижает ее относительную охлаждающую способность в период пузырькового кипения до 30%.

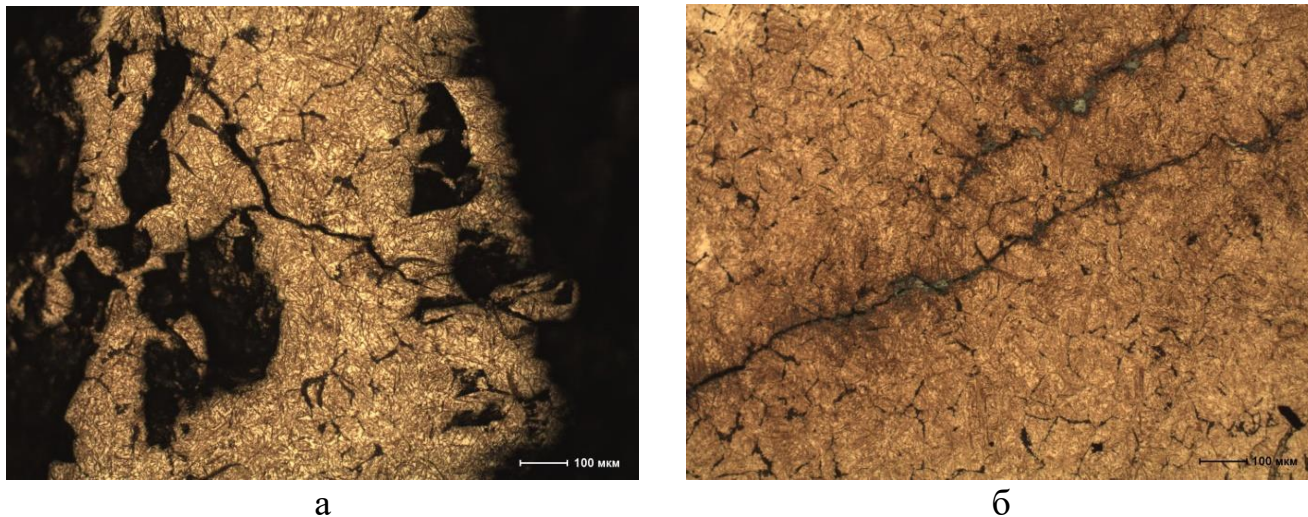
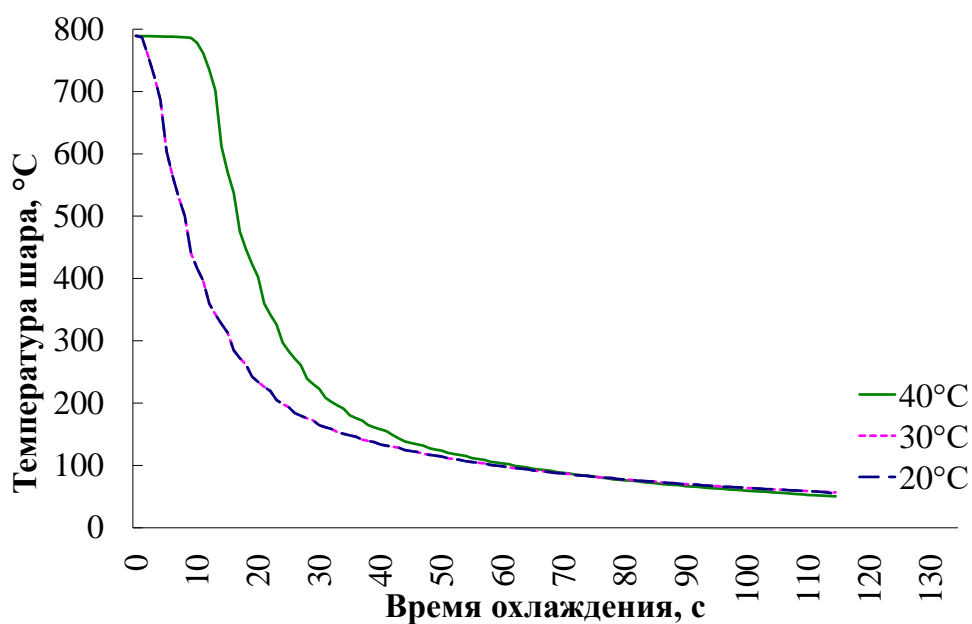
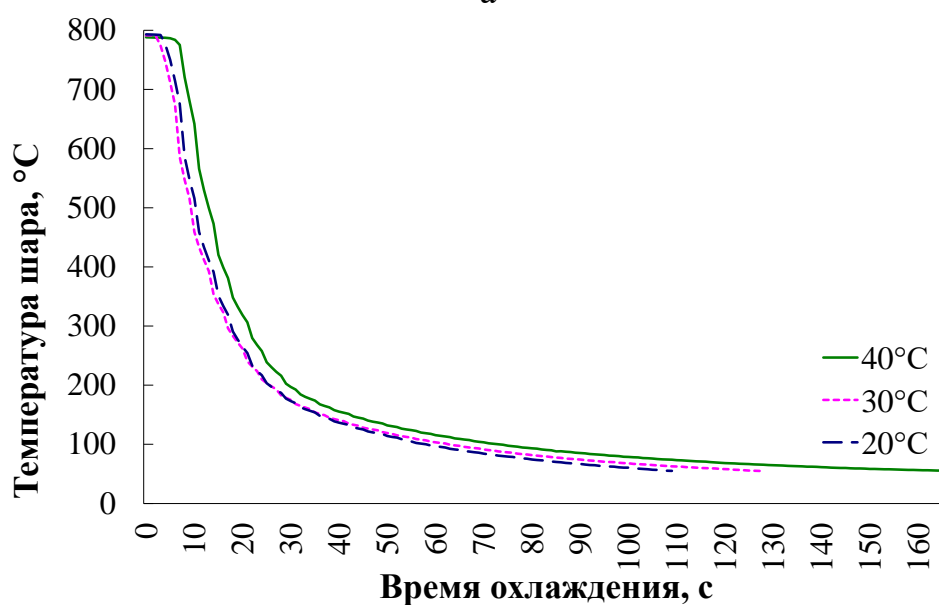


Рисунок 4.12 – Микротрещины в термообработанных шарах диаметром 100 мм: а – по границам расколовшегося шара; б – по границам зерен

С целью анализа влияния температуры охлаждающей среды на ее закалочную способность применительно к рассматриваемой стали Ш76ХФ провели лабораторные исследования. Охлаждающую способность исследовали с использованием установки «Компатон», которая включает в себя цифровой термометр и датчик температуры. Указанная установка позволяет в автоматическом режиме производить запись измеренных значений температуры с определенным, заранее заданным интервалом, на базе которых с использованием программы «ТС Soft» происходит построением кривых охлаждения в формате пригодном для дальнейшей цифровой обработки. Полученные результаты (рисунок 4.13) свидетельствуют об отсутствии значимых отличий охлаждающей способности, как воды, так и водного 2% раствора полимера «ПКМ» при температурах 20°С и 30°С и значимом ее снижении при температуре 40°С [144, 145]. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что при закалке шаров из стали Ш76ХФ целесообразно поддерживать температуру охлаждающей воды в пределах не более 25°С.



а



б

Рисунок 4.13 – Охлаждающая способность воды (а) и водного раствора полимера «ПКМ» (б) при закалке мелющих шаров из стали Ш76ХФ

Опытно-промышленное опробование производства мелющих шаров диаметром 100 мм из экономнолегированной стали Ш76ХФ с использованием разработанных технологических рекомендаций по режимам прокатки и термообработки подтвердило соответствие готовых шаров требованиям ГОСТ 7524-2015 для 5-й группы твердости; при этом готовые шары обладают повышенной ударной стойкостью по отношению к мелющим шарам из стандартных сталей пониженных групп твердости (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Сравнительный анализ ударной стойкости мелющих шаров

Доля шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость		
4-ая группа твердости		5-ая группа твердости
Сталь Ш2.3 (стандартный режим прокатки)	Сталь Ш2.3 оптимизированного состава (новый режим прокатки)	Сталь Ш76ХФ (разработанный режим прокатки и термообработки)
4,6	2,7	1,9

Соответствие мелющих шаров, произведенных по разработанной технологии, требованиям ГОСТ 7524-2015 для 5-й группы твердости и их повышенная ударная стойкость подтверждены Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

#### 4.4 Выводы

1. На основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в условиях промышленного шаропрокатного стана 40-100, подтверждена возможность и технологичность производства мелющих шаров высокой объемной твердости диаметром до 100 мм из экономнолегированной стали Ш76ХФ. При этом установлено значительное (в среднем в 1,4 раза) увеличение нагрузки на оборудование, как сортовых прокатных станов при производстве шаровых заготовок, так и шаропрокатного стана при производстве мелющих шаров из указанной экспериментальной стали относительно применения сталей стандартных марок.

2. С целью уменьшения износа реборд валков шаропрокатного стана, повышенная величина которого имеет место при производстве шаров из стали Ш76ХФ, разработана новая калибровка валков для прокатки шаров диаметром 100 мм с непрерывно-изменяющейся высотой реборды. Эффективность указанной калибровки подтверждена результатами компьютерного моделирования интенсивности напряжений на поверхности шаров и результатами опытно-промышленной прокатки шаров. По результатам моделирования установлено

снижение величины напряжений в зонах внедрения реборды в заготовку в 1,14-1,23 раза, а по результатам опытной прокатки определено уменьшение удельного расхода прокатных валков на 18-22% (подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве).

3. На основании комплекса экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и промышленных условиях, обоснована оптимальная температура охлаждающей воды не выше 25°C при закалке шаров из стали Ш76ХФ. Соблюдение указанной рекомендации обеспечивает формирование однородной микроструктуры мартенсит+карбиды, обладающей повышенной твердостью и устойчивостью к ударным нагрузкам.

4. Опытное-промышленное опробование разработанных технологических режимов производства мелющих шаров диаметром 100 мм из стали Ш76ХФ показало соответствие готовых шаров требованиям ГОСТ 7524-2015 для 5-й группы твердости и их повышенную ударную стойкость, что подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

## Заключение

1. На основании комплекса исследований, проведенных для условий промышленного шаропрокатного стана 40-100, определены и обоснованы закономерности влияния температурных режимов поперечно-винтовой прокатки шаров и их химического состава на показатели твердости и ударной стойкости мелющих шаров после их термообработки. Статистическими исследованиями установлено и подтверждено результатами математического моделирования процесса прокатки шаров и металлографического анализа их микроструктуры значимое влияние повышения температуры прокатки мелющих шаров в существующем диапазоне ее изменения (880-1000°С) на увеличение их твердости и ударостойкости. Определено значимое влияние увеличения содержания углерода, марганца и хрома в сталях стандартных марок на повышение твердости шаров, а также – значимое влияние увеличения содержания углерода, серы и фосфора в сталях на снижение ударостойкости шаров.

2. На базе полученных закономерностей, а также опираясь на результаты дополнительно проведенных аналитических исследований влияния температуры прокатки на технико-экономические показатели производства мелющих шаров и компьютерного моделирования напряженного состояния металла при прокатке шаров, разработан энерго- и металлосберегающий температурный режим производства мелющих шаров из стали оптимизированного химического состава. Опытно-промышленное опробование нового режима прокатки показало, что при его использовании происходит уменьшение отбраковки мелющих шаров по результатам контроля твердости и ударостойкости на 2,9%, снижение удельных расходов электроэнергии на 9 кВт·ч/т и прокатных валков на 0,12 кг/т, что подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

3. Лабораторными и аналитическими исследованиями установлена принципиальная возможность производства мелющих шаров высокой объемной твердости из сталей опытного химического состава, микролегированных

ванадием при варьировании содержания в них углерода, марганца, хрома и никеля в широких пределах. Определены и обобщены в виде уравнения регрессии закономерности влияния химического состава разработанных экспериментальных сталей, микролегированных ванадием, и параметров их деформации на сопротивление пластическому деформированию. Установлено, что повышение содержания углерода, марганца, хрома и никеля в таких сталях линейно увеличивает их сопротивление деформации вне зависимости от термомеханических и скоростных параметров деформации. При этом увеличение скорости и степени деформации, а также уменьшение температуры деформации в диапазоне характерном для горячей прокатки на промышленных станах, приводит к повышению сопротивления деформации всех сталей. Адекватность полученного уравнения регрессии подтверждена для условий прокатки на действующих сортовых и шаропрокатном станах, что свидетельствует о возможности его применения при разработке и совершенствовании режимов прокатки.

4. Экспериментальными исследованиями в промышленных условиях обоснована технологичность и эффективность производства мелющих шаров высокой объемной твердости диаметром до 100 мм из опытной стали Ш76ХФ. Разработаны применительно к шарам из указанной экспериментальной стали режимы их прокатки и термомеханической обработки, опытно-промышленное опробование которых показало, что получаемые шары обладают одновременно повышенной объемной твердостью и ударной стойкостью (подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве).

5. Разработана новая калибровка валков для производства шаров диаметром 100 мм, обеспечивающая по результатам проведенного математического моделирования снижение напряжений в зонах внедрения реборды в заготовку в 1,14-1,23 раза. Опробование разработанной калибровки показало уменьшение удельного расхода прокатных валков на 18-22% при производстве шаров из различных сталей, что подтверждается Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются в при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», что подтверждено соответствующей Справкой.

## Библиографический список

1. ГОСТ 7524-2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц: Технические условия: дата введения 2016-04-11 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 8 с.

2. Сталинский, Д. В. Оценка влияния твердости мелющих шаров на износ и эффективность процесса измельчения железистых кварцитов / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. К. Солёный // Экология и промышленность. – 2019. – № 1 (58). – С. 69-76.

3. Промышленные испытания мелющих шаров повышенной твердости при измельчении железистых кварцитов / Серов А. И., Смирнов Е. Н., Скляр В. А., Белевитин В. А. // Обогащение руд. – 2017. – № 3 (369). – С. 15-20.

4. 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.

5. Подстуживание мелющих шаров перед закалкой. Моделирование и эксперимент / Шевченко О. И., Лановенко И. Э., Рубцов В. Ю., Опарин А. С. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 35-40.

6. Освоение производства мелющих шаров группы твердости V в ПАО "Донецкий металлургический завод" / Лам М. М., Серов А. И., Смирнов Е. Н., Тернавский А. Н., Михеев В. В. // Сталь. – 2017. – № 5. – С. 29-33.

7. Освоение производства мелющих шаров диаметром 40 и 60 мм III и IV групп твердости в ПАО "Донецкий металлургический завод" / Лам М. М., Серов А. И., Смирнов Е. Н., Тернавский А. А., Базарова Г. С. // Металлург. – 2016. – № 4. – С. 87-91.

8. Оценка применимости непрерывнолитой стали марки 55 при производстве мелющих шаров диаметром 40 мм групп твердости IV и V /

Смирнов Е. Н., Смирнов А. Н., Михеев В. В. [и др.]. // Сталь. – 2020. – № 4. – С. 44-49.

9. Баранов, Н. А. Производство мелющих шаров из рельсовой стали / Н. А. Баранов, О. Н. Тулупов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2017. – Т. 1. – С. 96-99.

10. Сталинский, Д. В. Эффективность использования мелющих шаров малого диаметра для помола цемента / Д. В. Сталинский, А.С. Рудюк, В. К. Соленый // Сталь. – 2022. – № 6. – С. 15-19.

11. Сычков, А. Б. О выборе материала и режимов термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка / А. Б. Сычков, А. Б. Стеблов, С. Н. Березов // Литье и металлургия. – 2013. – № 3 (71). – С. 30-32.

12. Состояние производства и пути повышения качества стальных мелющих шаров / Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Соленый В. К., Юдин А. В. // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 28-34.

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

14. Сталинский, Д. В. Освоение производства и оценка эффективности использования высококачественных мелющих шаров Сообщение 1. Освоение производства шаров из хромомолибденовой стали / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. К. Соленый // Сталь. – 2021. – № 11. – С. 36-39.

15. Способы испытания мелющих шаров на ударную стойкость / Лановенко И. Э., Рубцов В. Ю., Шведов К. Н., Галимьянов И. К. // Калибровочное бюро. – 2021. – № 19. – С. 22-27.

16. Способ испытания мелющих шаров на ударную стойкость: пат 2759709 Рос. Федерация: МПК51 G01M 7/08; G01N 3/34 / П. А. Зажигает [и др.]; заявитель и патентообладатель Акционерное общество Нижнетагильский металлургический комбинат (АО ЕВРАЗ НТМК), №2020142166; заявл. 20.12.2020; опубл.

17.11.2021. Бюл. №32. – 11 с.

17. Grinding media quality assurance for the comminution of gold ores / Moema J.S., Papo M.J., Slabbert G.A., Zimba J. // World Gold Conference 2009, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. – P. 27-34.

18. Рахутин, М. Г. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров / М. Г. Рахутин, П. Ф. Бойко // Уголь. – 2017. – №12 (1101). – С. 49-53.

19. Сталинский, Д.В. Исследование трибологических свойств сталей для мелющих шаров / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. К. Соленый // Сталь. – 2021. – № 7. – С. 48-54.

20. Мелющие шары повышенной точности / Рубцов В. Ю., Шевченко О. И., Алыпов П. А., Лебедев В.А. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 86-96.

21. Ефременко, В. Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц / В. Г. Ефременко // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2000. – №9. – С. 89-91.

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

23. Ефременко, В. Г. Влияние макроструктурного состояния шаровой заготовки на качество стального проката для помольного оборудования. / В. Г. Ефременко // Металл и литье Украины. – 2002. – №9-10. – С. 40-42.

24. Анализ причин растрескивания мелющих шаров при эксплуатации/ Сун Ч., Пу И., Лю Ч., Ван Б. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – №2 (800). – С. 59-65.

25. Шабурова Н. А. Особенности разрушения стальных мелющих шаров / Н. А. Шабурова // Вестник машиностроения. – 2019. – № 2. – С. 74-77.

26. Артес, А. Э. Проблема совершенствования производства мелющих шаров. Качество и инновации / А. Э. Артес, В. В. Третьюхин // Компетентность. –

2014. – № 3 (114). – С. 50-53.

27. Качество мелющих шаров, изготовленных разными методами / Вдовин К. Н., Феоктистов Н.А., Абенова М. Б., Куликов В. Д., Кондратьев И. С. // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 1 (16). – С. 78-81.

28. Стеблов, А. Б. Литые чугунные шары для помола материалов / А. Б. Стеблов, С. Н. Березов, А. А. Козлов // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – С. 45-49.

29. Поддубный, А. Н. Краткий обзор технологий, применяемых в мировой практике при производстве мелющих тел / А. Н. Поддубный // Литейщик России. – 2009. – №2. – С. 30-35.

30. Вавилкин, Н. М. К выбору материала для производства мелющих шаров / Н. М. Вавилкин, В. В. Челноков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – №1. – С. 41-46.

31. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / Игнатов В. А., Солёный В. К., Жук В. Л., Туяхов А. И. // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 31–34. 16.

32. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы / А. Н. Крутилин, Н. И. Бестужев, А. Н. Бестужев, Д. Н. Каленкович // Литье и металлургия. – 2009. – № 4. – С. 26-33.

33. Опыт освоения производства стальных мелющих шаров в ПАО "Северсталь" / Адигамов Р. Р., Никишин И.А ., Жителев П. С., Андреев А. Р., Карлина А. И. // Сталь. – 2022. – № 3. – С. 13-18.

34. Галимьянов, И. К. Исследование и совершенствование технологии производства мелющих шаров повышенной объемной твердости на основе физического и компьютерного моделирования: диссертация .... канд. техн. наук: 2.6.4 / Галимьянов Ильяс Каримович. – Екатеринбург, 2023. – 155 с.

35. Поперечная прокатка в машиностроении / В. С. Смирнов, В. П. Анисифоров, М. В. Васильчиков [и др.]. – Москва; Ленинград: МАШГИЗ, 1957. – 376 с.

36. Грановский, С. П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах / С. П. Грановский. – М: Металлургия, 1980. – 116 с.

37. Специальные прокатные станы // Целиков А.И ., Барбарич М. В., Васильчиков М. В, Грановский С. П., Жукевич-Стоша Е. А. – М.: Металлургия, 1971. – 336 с.

38. Сичевой, А. П. Упрощение калибровки и технологии изготовления многозаходных валков с винтовыми калибрами для прокатки шаров / А. П. Сичевой, С. С. Зозулин // Сборник научных статей №37. Машины и агрегаты для производства труб и проката. – Москва, 1974. – С. 175-179.

39. Зозулин, С. С. Многозаходная калибровка валков для прокатки шаров / С.С. Зозулин // Бюллетень ЦИИНЧМ. – 1967. – № 22. – С. 42-44.

40. Тетерин, П. К. Теория поперечной и винтовой прокатки / П. К. Тетерин. – М.: Металлургия, 1983. – 270 с.

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

42. Перетятыко, В. Н. Калибровка валков для прокатки шара / В. Н. Перетятыко, А. С. Климов, М. В. Филиппова // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2012. – № 30. – С. 44-50.

43. Шахобутдинов, Р. Э. Калибровка шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв для прокатки стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 Сообщение 1. / Р. Э. Шахобутдинов // Калибровочное бюро. – 2021. – № 18. – С. 25-28.

44. Шахобутдинов, Р. Э. Калибровка шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв для прокатки стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 Сообщение 2. / Р. Э. Шахобутдинов, Н. Н. Бегимов, Т. Д. Хожибеков // Калибровочное бюро. – 2021. – № 19. – С. 16-21.

45. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1. / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С.27-30.

46. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2. / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С.16-20.

47. Котенок, В. И. Энергоэкономные калибровки валков шаропрокатных станов / В. И. Котенок, С. И. Подобедов // Металлург. – 2001. – № 9. – С. 45–47.

48. Рубцов, В. Ю. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // Черная металлургия. – 2018. – № 8 (1424). – С. 58–63.

49. Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении / Целиков А. И., Казанская И. И., Сафонов А. С. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.

50. Котенок, В. И. Технологические возможности станов поперечно-клиновой прокатки при изготовлении мелющих шаров / В. И. Котенок, С. И. Подобедов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 5. – С. 25-27.

51. Рудович, З. А. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки компании «АМТ Инжиниринг» / З. А. Рудович, В. А. Клушин // НМ-Оборудование. – 2005. – № 1. – С. 24-27.

52. Агарков, К. Ю. Технологические особенности производства и использования мелющих шаров из высокоуглеродистой непрерывнолитой стали / К. Ю. Агарков // Вестник современных исследований. – 2018. – № 3.2 (18). – С. 127-131.

53. Сталинский, Д. В. Эффективность использования высококачественных мелющих шаров из хромомолибденовой стали при производстве цемента. Сообщение 2 / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. К. Солёный // Сталь. – 2021. – №12. – С. 32-36.

54. Сталинский, Д. В. Оценка эффективности использования мелющих шаров из хромомолибденовой стали при измельчении магнетитовых кварцитов. Сообщение 3 / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. К. Солёный // Сталь. – 2022. –

№1. – С. 51-55.

55. 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. – С. 31-40.

56. 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.

57. Сталь для мелющих шаров: пат. 2340699 Рос. Федерация: МПК С22С 38/54, С22С 38/32 / В. В. Павлов, О. В. Корнева, О. П. Атконова [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат»; №2006138549/02. – заявл. 31.10.2006; опубл. 10.12.2008.

58. Сталь: пат. 2425168 Рос. Федерация: МПК С22С 38/26, / А. Б. Юрьев, Н. Х. Мухатдинов, О.П . Атконова [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат»; № 2009136798/02. – заявл. 05.10.2009; опубл. 27.07.2011. Бюл. №21.

59. Сталь: пат. 2425169 Рос. Федерация: МПК С22С 38/40, / А.Б . Юрьев, Н. Х. Мухатдинов, Н. А. Козырев [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат»; №2009136799/02. – заявл. 05.10.2009; опубл. 27.07.2011. Бюл. №21.

60. 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. – №6. – С. 64-69.

61. JP 2009-041046 A, С22С 38/18, 26.02.2009.

62. JP 07-090379 A, С22С 38/60, 04.04.1995.

63. JP 06-287638 A, С22С 38/14, 11.10.1994.

64. An innovative method for producing balls from scrap rail heads / Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97. – No. 1-4. – P. 893-901.

65. Tomczak, J. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails / J. Tomczak, Z. Pater, T. Bulzak // Archives of Metallurgy and Materials. – 2018. – Vol. 63. – No. 1. – P. 5-12.

66. Колмогоров, В. Л. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.

67. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

68. Перетяtko, В. Н. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 2. Пластичность и разрушение сплавов в процессах нагрева и обработки давлением / В. Н. Перетяtko, М. В. Темлянцев, М. В. Филиппова. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.

69. Викторoв, Н. А. Горячая пластичность стали 09Г2С / Н. А. Викторoв // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 4 (646). – С. 46-47.

70. Матвеев, М. А. Исследование высокотемпературной пластичности микролегированных сталей / М. А. Матвеев, Н. Г. Колбасников // Сталь. – 2016. – №4. – С. 47-51.

71. Исследование влияния температуры нагрева на технологическую пластичность стали 15X13H2 применительно к процессу винтовой прошивки / Корсаков А. А., Михалкин Д. В., Алютина Е. В. [и др.]. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 2020. – Т. 76. – №2. С. 162-168.

72. Высокотемпературные характеристики сталей С45 и С70 / С. Савицкий, К. Лабер, Х. Дья, А. Кавалев // Качество в обработке материалов. – 2016. – №1 (5). С. 8-11.

73. Повышение пластичности среднеуглеродистых марок стали при температурах прокатки / Д. С. Езупенок, Д. Ж. Исакова, Г. Б. Нургалиева, П. О. Быков. // Наука и техника Казахстана. – 2014. – №3-4. – С. 20-24.

74. Hot plasticity and processing maps of new secondary-hardening ultra-high strength steel / F. Wang, Y.-J. Zhang, Z.-Y. Yang, Q. Gao. // Suxing Gongcheng Xuebao/Journal of Plasticity Engineering. – 2016. – Vol. 23. – №6. – pp. 137-142.

75. Hot plasticity of 690 MPa grade steel for marine engineering / Zhou Y., Yan L., Li S. [etc.]. // *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*. – 2016. – Vol. 41. – №8. – pp. 14-17.

76. Determination of characteristics of plasticity of selected medium and high carbon steel grades in hot torsion test / K. Laber, H. Dyja, A. Kawałek, S. Sawicki. // *Metalurgija*. – 2016. – Vol. 55. – №4. – pp. 635-638.

77. Hot plasticity and fracture mechanism of the third generation of automobile steel / Fan Y., Wang M.-L., Zhang H. [etc.] // *Beijing Keji Daxue Xuebao/Journal of University of Science and Technology Beijing*. – 2013. – Vol. 35. – №5. – pp. 607-612.

78. Knapieński, M. Analysis of the plasticity of high-carbon alloy steel in the conditions of hot plastic working / M. Knapieński, M. Kwapisz, A. Kawałek // *Solid State Phenomena*. – 2010. – Vol. 165. – pp. 85-90.

79. Investigation of the Hot Plasticity of Duplex Stainless Steel / Lin G., Zhang Z.-X., Song H.-W. [etc.]. // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2008. – Vol. 15. – №6. – pp. 83-86.

80. Hot plasticity of 304HC stainless steel and the establishment of the model of resistance to deformation / G.-Z. Cui, H.-S. Di, X.-H. Liu, G.-D. Wang // *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. – 2001. – Vol. 22. – №6. – pp. 656-659.

81. Шор, Э. Р. Новые процессы прокатки / Э. Р. Шор. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 386 с.

82. Совершенствование технологии производства стальных мелющих шаров в АО "ЕВРАЗ ЗСМК" / Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Солёный В. К. [и др.] // *Сталь*. – 2016. – № 7. – С. 86-89.

83. 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.

84. Филиппова, М. В. Качество мелющих шаров / М. В. Филиппова, А. В. Климов, В. Н. Перетяtko // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 30-35.

85. Quenching and Partitioning–Based Heat Treatment for Rolled Grinding Steel Balls / Zurnadzhy V., Efremenko V.G., Wu K. M., Lekatou A. // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. – Vol. 51. – pp. 1-4.

86. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation / J. G. Speer, D. V. Edmonds, F. Rizzo, D. Matlock // Solid State and Materials Science. – № 8. – 2004. – P. 219-237.

87. Enhanced stability of retained austenite and consequent work hardening rate through pre-quenching prior to quenching and partitioning in a Q-P microalloyed steel / J. Zhang, H. Ding, R. D. K. Misra, C. Wang // Materials Science & Engineering. – 2014. – A 611. – P. 252-256.

88. Hsu, T. Y. Strengthening and toughening mechanisms of quenching-partitioning-tempering steels / T. Y. Hsu, X. J. Jin, Y. H. Rong // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – № 577S. – P. 568-571.

89. Influence of metastable retained austenite on macro and micromechanical properties of steel processed by the Q&P process / H. Jirkova, B. Masek, M. F.-X. Wagner, D. Langmajerova // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – № 615. – P. 163-168.

90. Effect of fresh martensite on the stability of retained austenite in quenching and partitioning steel / De Knijf D., Petrov R., Fojer C., Kestens L. A. I. // Materials Science & Engineering A. – 2014. – № 615. – P. 107-115.

91. A new effect of retained austenite on ductility enhancement in high-strength quenching-partitioning-tempering martensitic steel / K. Zhang, M. Zhang, Z. Guo, N. Chen // Materials Science and Engineering A. – 2011. – № 528. – P. 8486-8491.

92. Промышленные испытания мелющих шаров IV группы твердости производства ПАО "Донецкий металлопрокатный завод" / Лам М. М., Серов А. И., Смирнов Е. Н., Тернавский А. А., Базарова Г. С. // Металлург. – 2016. – № 9. –

С. 68-72.

93. Кузнецов, И. С. Технологические резервы эффективности металлургического производства мелющих шаров / И.С. Кузнецов, А. Б. Юрьев, А. Р. Фастыковский // Сталь. – 2021. – № 7. – С. 23-25.

94. Опыт освоения металлургическим комбинатом "Азовсталь" технологии производства катаных мелющих шаров диаметром 120 мм с твердостью по 3-й группе ДСТУ 3499 / Ефременко В. Г., Ганошенко И. В., Ткаченко Ф. К. [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – № 3 (5). – С. 25-28.

95. Термическая обработка мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / Шевченко О. И., Трекин Г. Е., Рубцов В. Ю., Курочкин В. В. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 110-117.

96. Самойлович, Ю. А. Возможности повышения эксплуатационного ресурса крупных мелющих шаров из высокохромистой стали при использовании термоциклической обработки / Самойлович Ю. А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 6 – (1410). – С. 73-80.

97. Кузьмин, С. О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированной стали / С. О. Кузьмин // Вестник Приазовского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – №2 (23). – С. 117-126.

98. Effect of heat treatment on tribological behavior of forged steel balls / Khedidja B., Mounira B., Amel G. [et all] // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2123. – 030004.

99. Bai, X. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill / X. Bai, Y. Jin // Jinshu Rechuli / Heat Treatment of Metals. – 2017. – Vol. 42. – No. 5. – pp. 193-196.

100. Шахобутдинов, Р. Э. Результаты освоения выпуска стальных мелющих шаров  $\varnothing 50$ мм по ГОСТ 7524-2015 на линии ШПС 80-120 в производственных

условиях АО "Узметкомбинат" / Р. Э. Шахобутдинов, А. Р. Каримова, Т. Н. У. Носиров // *Universum: технические науки.* – 2024. – № 10-2 (127). – С. 35-38.

101. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра / Ефременко В. Г., Попов Е.С., Кузьмин С. О., Труфанова О. И., Ефременко А. В. // *Металлург.* – 2013. – № 9. С. 88-92.

102. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров / Айсат С., Садэдин А., Брадай М. А. [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2017. – №5. – С. 34-38.

103. Ефременко, В. Г. Термическое упрочнение стальных мелющих шаров при обработке на заданную твердость / В. Г. Ефременко // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2002. – № 4. – С.51-54.

104. Shi, X. Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling / X. Shi, B. Wang // *Materials Science Forum.* – 2012. – pp. 151-154.

105. Рубцов, В. Ю. Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных деталей / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // *Калибровочное бюро.* – 2019. – № 15. – С. 24-36.

106. Кожевникова, Г. В. Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток / Г. В. Кожевникова // *Вестник Белорусско-Российского университета.* – 2009. – №1(22). – С. 44-53.

107. Pater, Z. A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls / Z. Pater // *МЕТАВК.* – 2016. – 55(2). – pp. 233-236.

108. Исследование влияния параметров деформации на качество сортовых заготовок и мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовых сталей / Уманский А. А., Юрьев А. Б., Симачев А. С., Думова Л. В. // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2022. – Т. 65. – № 8. – С. 596-603.

109. Математическое моделирование прокатки шаров / Филиппова М. В., Темлянцев М. В., Перетяшко В. Н., Прудкий Е. Е. // *Известия Вузов. Черная металлургия.* – 2017. – Т.60. – №7. – С. 516-521

110. Рубцов, В. Ю. Моделирование прокатки мелющих шаров на валках с непрерывно изменяющимся шагом / В. Ю. Рубцов, В. В. Курочкин, О. И. Шевченко // Черные металлы. – 2020. – № 6. – С. 36-40.

111. Рубцов, В. Ю. Совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки и технологии производства мелющих шаров: диссертация .... канд. техн. наук: 05.16.05 / Рубцов Виталий Юрьевич. – Екатеринбург, 2021. – 189 с.

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

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

114. Шварц, Д. Л. Компьютерное моделирование новой калибровки шаропрокатных валков двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей / Д. Л. Шварц, И. К. Галимьянов, А. А. Семенов // Metallurg. – 2022. – № 6. – С. 80-84.

115. Компьютерное моделирование процесса термической обработки мелющих шаров / Сидоров А. А., Семенов А. А., Лановенко И. Э. [и др.] // Metallurg. – 2021. – №7. – С. 35-43.

116. Tofil, A. Overview of the research on roll forging process / A. Tofil, Z. Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – Vol. 11. – Issue 2. – pp. 72-86.

117. Chyla, P. Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls / P. Chyla, Z. Pater, J. Tomcza // Arch. Metall. Mater. – 2016. – Vol. 61. – №2. – pp. 485-492

118. Sokhan, D. Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol. 83. – №2. – pp. 24-30.

119. Морозов, И. С. Развитие технических и технологических основ производства конвертерных сталей для мелющих шаров с повышенными эксплуатационными свойствами: диссертация .... канд. техн. наук: 2.6.2 / Морозов Иван Сергеевич. – Новокузнецк, 2024. – 125 с.

120. Касаткин, О. Г. Расчетные модели для определения критических точек стали / О. Г. Касаткин, Б. Б. Винокур, В. Л. Тимошенко // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1984. – № 1. – С. 20-22.

121. Лахтин, Ю. М. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю.М. Лахтин. – М.: Альянс, 2015. – 448 с.

122. Гуляев, А. П. *Металловедение и термическая обработка металлов* / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. – М.: Альянс, 2023. – 722 с.

123. Харламов, А. А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением / А. А. Харламов, А. П. Уваров // *САПР и графика.* – 2003. – №6. – С. 10-15.

124. Применение системы DEFORM для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением / Д. В. Бузлаев, В. А. Кропотов, А. А. Сахарчук, А. А. Харламов. – М.: ТЕСИС, 2001. – 13 с.

125. Байдин, В. В. Моделирование и разработка технологических режимов производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости / В. В. Байдин, А. А. Уманский // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2025. – Т. 68. – №3. – С. 218-227.

126. Особенности формирования микроструктуры мелющих тел, произведенных из рельсовых сталей различного химического состава / Уманский А. А., Байдин В. В., Симачев А. С., Думова Л. В. // В сборнике трудов XXIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2022. – С. 21-28.

127. Мигачев, Б. А. Сопротивление деформации в механике обработке давлением / Б. А. Мигачев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 176 с.

128. Андреюк, В. Л. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / В. Л. Андреюк, Г. Г. Тюленев, Б. С. Прицкер // Сталь. – 1972. – № 6. – С. 522-523.

129. Остапенко, А. Л. Оценка влияния методики определения сопротивления деформации на погрешность расчета силы горячей прокатки полос и листов / А.Л. Остапенко, Е. А. Руденко, Л. А. Курдюкова // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2013. – №6. – С. 38-44.

130. Сопротивление деформации ниобийсодержащих сталей новых марок // В. М. Салганик, С. В. Денисов, В. И. Крайнев, О. Н. Сычев. // Производство проката. – 2007. – №6. – С. 15-18.

131. Исследование пластичности и сопротивления деформации стали типа 13CR, применяемой для изготовления труб высоких групп прочности / Космацкий Я. И., Фокин Н. В., Баричко Б. В. // Черные металлы. – 2022. – № 6. – С. 49-54.

132. Исследование сопротивления деформации мартенситно-старяющей стали ЭП679 / С. В. Гладковский, А. И. Потапов, С. В. Лепихин // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Issue 4. – pp. 18-28.

133. Исследование сопротивления пластической деформации стали марок ЭП450-Ш и ЭП823-Ш в горячем и холодном состоянии / Космацкий Я. И., Фокин Н. В., Баричко Б. В., Яковлева К. Ю., Николенко В. Д. // Металлург. – 2021. – № 7. – С. 29-34.

134. Modeling of the Resistance to Hot Deformation and the Effects of Microalloying in High-Al Steels under Industrial Conditions / J. M. Rodriguez-Ibabe, I. Gutiérrez, B. López, A. Iza-Mendia. // Materials Science Forum. – Vol. 500-501. – pp. 195-202.

135. Сопротивление деформации азотсодержащей мартенситной стали / Ч. Юн-Цзюнь, Х. Вэй-Тао, Х. Цзинь-Тао // Сталь. – 2013. – №9. – С. 81-83.

136. Влияние скорости и температуры горячей деформации на сопротивление деформированию дулексной нержавеющей стали / Чжичао Ли,

Цзин У, Цяньнань Ли, Синьцзин Ли, Ляньфан Хэ, Хуэйпин Ли, Чжихуэй Цай // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2023. – № 2 (812). – С. 3-12.

137. Уманский, А. А. Развитие теоретических и технологических основ эффективного производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации: диссертация .... докт. техн. наук: 2.6.4 / Уманский Александр Александрович. – Новокузнецк, 2022. – 295 с.

138. Уманский, А. А. Исследование влияния химического состава сталей для производства мелющих шаров на их деформационные характеристики / А. А. Уманский, В. В. Байдин, А. С. Симачев // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2024. – Т. 67. – № 6. – С. 637-643.

139. Уманский, А. А. Экспериментальные исследования сопротивления пластической деформации легированных сталей для производства мелющих шаров / А. А. Уманский, В. В. Байдин // В сборнике трудов XXIV Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2024. – С. 172-174.

140. Ефимов, В. Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман – М.: Металлургия, 1996. – 254 с.

141. Зюзин, В.И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В. И. Зюзин, М. Я. Бровман, А. Ф. Мельников – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.

142. Тарновский, И. Я. Сопротивление деформации и пластичность стали при высоких температурах / И. Я. Тарновский. – Тбилиси: Сабчота сакартвело, 1970. – 224 с.

143. Гарост, А. И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцевистой стали / А. И. Гарост // *Литье и металлургия.* – 2006. – №1 (37). – С. 75-83.

144. Исследования процессов формирования микроструктуры мелющих шаров из рельсовой стали в зависимости от параметров закалочной среды / Уманский А. А., Байдин В. В., Симачев А. С., Думова Л. В., Сафонов С. О. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2023. Т. 66. № 6. С. 645-652.

145. Уманский, А. А. Основы комплексной технологии производства мелющих шаров повышенных групп твердости / А. А. Уманский, В. В. Байдин // В сборнике трудов XXIV Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2024. – С. 174-177.



**Справка об использовании результатов кандидатской диссертации соискателя ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» Байдина Вадима Викторовича в производстве**

В период с 2017 г. по 2024 г. при участии соискателя ФГБОУ ВО «СибГИУ» Байдина Вадима Викторовича в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведен комплекс научно-исследовательских работ, направленных на повышение параметров качества мелющих шаров и технико-экономических показателей их производства.

В рамках указанных работ разработаны при долевом участии соискателя 50% и прошли опытно-промышленное опробование новые эффективные режимы производства шаров, в том числе:

- энерго- и металлосберегающий температурный режим производства мелющих шаров 4-ой группы твердости из стали оптимизированного химического состава, применение которого позволяет снизить отбраковку мелющих шаров на 2,9%, уменьшить удельный расход электроэнергии на 9 кВт•ч/т и прокатных валков на 0,12 кг/т.

- новая калибровка валков для производства шаров диаметром 100 мм, обеспечивающая уменьшение удельного расхода прокатных валков на 18-22% при производстве шаров из различных сталей;

- режим прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм нормируемой объемной твердости и повышенной ударной стойкости из экспериментальной стали, показавший свою технологичность и эффективность.

Данный документ подтверждает использование теоретических и научных результатов, отраженных в диссертационной работе, в производстве и не является основанием для финансовых претензий.

Начальник технического управления

К.В. Шишкин

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной  
деятельности  
к.т.н., доцент



*[Handwritten signature]*

О.Г. Приходько  
2025 г.

**Справка**

**о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс**

Результаты диссертационной работы Байдина Вадима Викторовича «Развитие технологических основ ресурсосберегающего производства катаных мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости» внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и используются при проведении лекционных и практических занятий по следующим дисциплинам: «Оборудование и объемно-планировочные решения современных цехов черной металлургии», «Теория и технология обработки металлов давлением», «Теория производства прокатной продукции».

Заведующий кафедрой «Обработка металлов  
давлением и материаловедение. ЕВРАЗ ЗСМК»,  
д.т.н., доцент

*[Handwritten signature]*

Е.В. Арышенский

Начальник Управления организации  
и сопровождения образовательной деятельности,  
к.э.н., доцент

*[Handwritten signature]*

Т.А. Волкова