

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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Уманский Александр Александрович

Новокузнецк, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Уманский Александр Александрович

Официальные оппоненты: Шварц Данил Леонидович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой обработки
металлов давлением ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», г. Екатеринбург

Будников Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры обработки металлов
давлением ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСИС», г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск

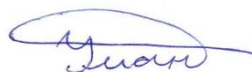
Защита состоится «3» декабря 2025 г. в 10-00 в ауд. 3П на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ.

факс: (3843) 46-57-92; e-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» www.sibsiu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.401.01,
д.т.н., доцент



Уманский Александр
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, износо- 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 станков.

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. Перетягко и др. Однако в условиях современных промышленных прокатных станов 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;

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.

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. Опытное-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 сталеплавильщиков 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор современных технологических решений при производстве стальных мелющих шаров с повышенными эксплуатационными характеристиками. В рамках данной главы проанализированы основные требования к регламентируемым параметрам качества и характеристикам стальных мелющих шаров, представлен анализ существующих технологических схем производства катаных мелющих шаров, выделены наиболее перспективные направления совершенствования технологии производства катаных мелющих шаров, в том числе с использованием математического моделирования в специализированных прикладных программных комплексах. По результатам проведенного аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследований, направленных на разработку энерго- и металлосберегающих режимов производства мелющих шаров массового сортамента высокой твердости поверхности с нормированной твердостью на глубине 0,5 радиуса шара (4 группа твердости по ГОСТ 7524-2015), дополнительно обладающих повышенной ударной стойкостью. Исследования, направленные на обоснование направлений оптимизации химического состава и температурных режимов прокатки мелющих шаров, проводили применительно к условиям действующего шаропрокатного стана 40-100 и включали в себя четыре этапа.

На первом этапе проведен статистический анализ влияния параметров производства мелющих шаров диаметром 60 мм из специализированной стандартной стали марки Ш2.3 на их твердость и ударную стойкость. По результатам данного этапа получены уравнения регрессии, устанавливающие взаимосвязь показателей твердости и ударостойкости мелющих шаров с их химическим составом и температурными режимами прокатки:

$$НВ_{пов} = 3,35 + 18,6[C] + 11,2[Mn] + 17,4[Cr] + 0,025t_{выд}; \quad (1)$$

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

$$О_K = 2,55 + 5,01[C] + 12,6[S] + 9,8[P] - 0,003t_{выд}, \quad (3)$$

где $НВ_{пов}$ и $НВ_{1/2R}$ – твердость шаров на поверхности и на глубине $\frac{1}{2}$ радиуса; $О_K$ – отбраковка шаров при копровых испытаниях (испытаниях на ударную стойкость), %; [C], [Mn], [Cr], [S] и [P] – содержание углерода, марганца, хрома, серы и фосфора в стали, %; $t_{выд}$ – температура выдачи заготовок под прокатку, °С.

Согласно полученных данных повышение содержания углерода, марганца и хрома в стали, а также увеличение температуры выдачи заготовок под прокатку мелющих шаров оказывает значимое влияние на повышение показателей их твердости. В свою очередь увеличение содержания углерода, серы и фосфора в стали, а также снижение температуры выдачи заготовок под прокатку шаров значимо увеличивают отбраковку шаров при испытаниях на ударную стойкость, то есть снижают ударостойкость шаров. При этом наибольшую степень относительного влияния, как на твердость, так и на ударную стойкость мелющих шаров оказывает температура выдачи заготовок под прокатку.

По результатам данного этапа разработаны рекомендации по оптимизации химического состава стали Ш2.3 (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав стали для производства мелющих шаров высокой твердости поверхности с нормированной твердостью на глубине 0,5 радиуса шара

Марка стали	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P
					не более			
Ш2.3 (стандартная)	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

На втором этапе с целью обоснования механизмов влияния температуры прокатки мелющих шаров на показатели их твердости и ударной стойкости с использованием программного комплекса DEFORM проведено компьютерное моделирование изменения температуры поверхности шаров рассматриваемого сортамента в процессе их прокатки и подстуживания перед последующей закалкой. Полученные результаты свидетельствуют, что после прокатки имеет место снижение температуры поверхности шаров в среднем на 70°C. При этом вне зависимости от температуры нагрева исходных заготовок под прокатку имеет место значительная (до 50°C) неравномерность распределения температуры по поверхности шаров (рисунок 1), которая в наибольшей степени обусловлена наличием локальных зон повышенной температуры в местах наиболее интенсивной деформации (в местах внедрения реборды в заготовку при прокатке).

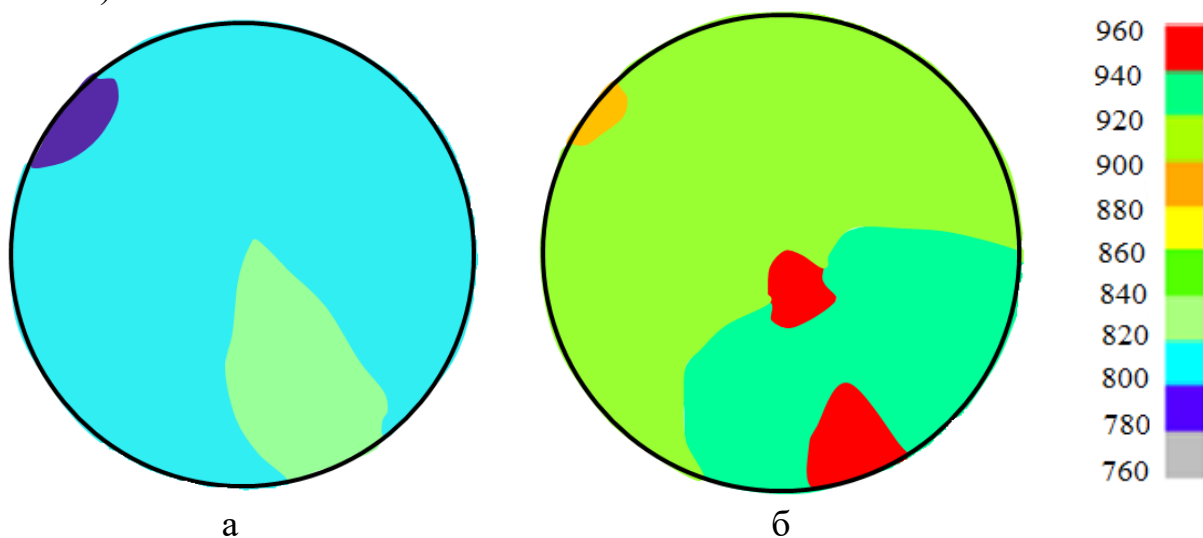


Рисунок 1 – Распределение температурных полей на поверхности шаров диаметром 60 мм после их прокатки при температуре выдачи заготовок 880°C (а) и 1000°C (б)

Согласно полученных результатов моделирования после охлаждения

шаров на конвейере перед их последующей закалкой температура поверхности шаров практически выравнивается вне зависимости от температуры прокатки в рамках существующего интервала изменения данного показателя. При этом в случае прокатки шаров с минимально допустимой температурой выдачи заготовок под прокатку (880°С) вне зависимости от продолжительности охлаждения мелющих шаров на конвейере после прокатки температура поверхности шаров перед закалкой имеет значение, близкое к температуре фазового превращения для рассматриваемой стали Ш2.3 (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты моделирования динамики изменения температуры мелющих шаров диаметром 60 мм при их прокатке и охлаждении

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

Металлографическим анализом микроструктуры шаров, проведенным в рамках третьего этапа исследований, показано, что микроструктура мелющих шаров из заготовок с температурой нагрева, близкой к нижней границе допустимого интервала (880°С) является двухфазной (мартенсит + феррит), что и обуславливает их пониженную твердость и ударную стойкость.

На четвертом этапе исследований проведен анализ влияния температуры выдачи заготовок под прокатку мелющих шаров на показатели, характеризующие удельные расходы энергоресурсов и материалов, потери металла при производстве шаров.

Проведенным в программном комплексе DEFORM компьютерным моделированием напряженного состояния металла показано, что при температуре прокатки, соответствующей нижней границе существующего допустимого интервала температуры выдачи заготовок из нагревательной печи (880°С) средние значения напряжений по укрупненным зонам поверхности значительно выше по сравнению с напряжениями, формирующиеся в аналогичных зонах при температуре выдачи заготовок 1000°С, соответствующей верхней границе допустимого интервала (рисунок 2). При этом в целом схемы напряженного состояния металла при различных температурных режимах прокатки имеют аналогичный характер. 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.

Таким образом, повышение температуры прокатки мелющих шаров в 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 подтверждено фактическими данными промышленной прокатки.

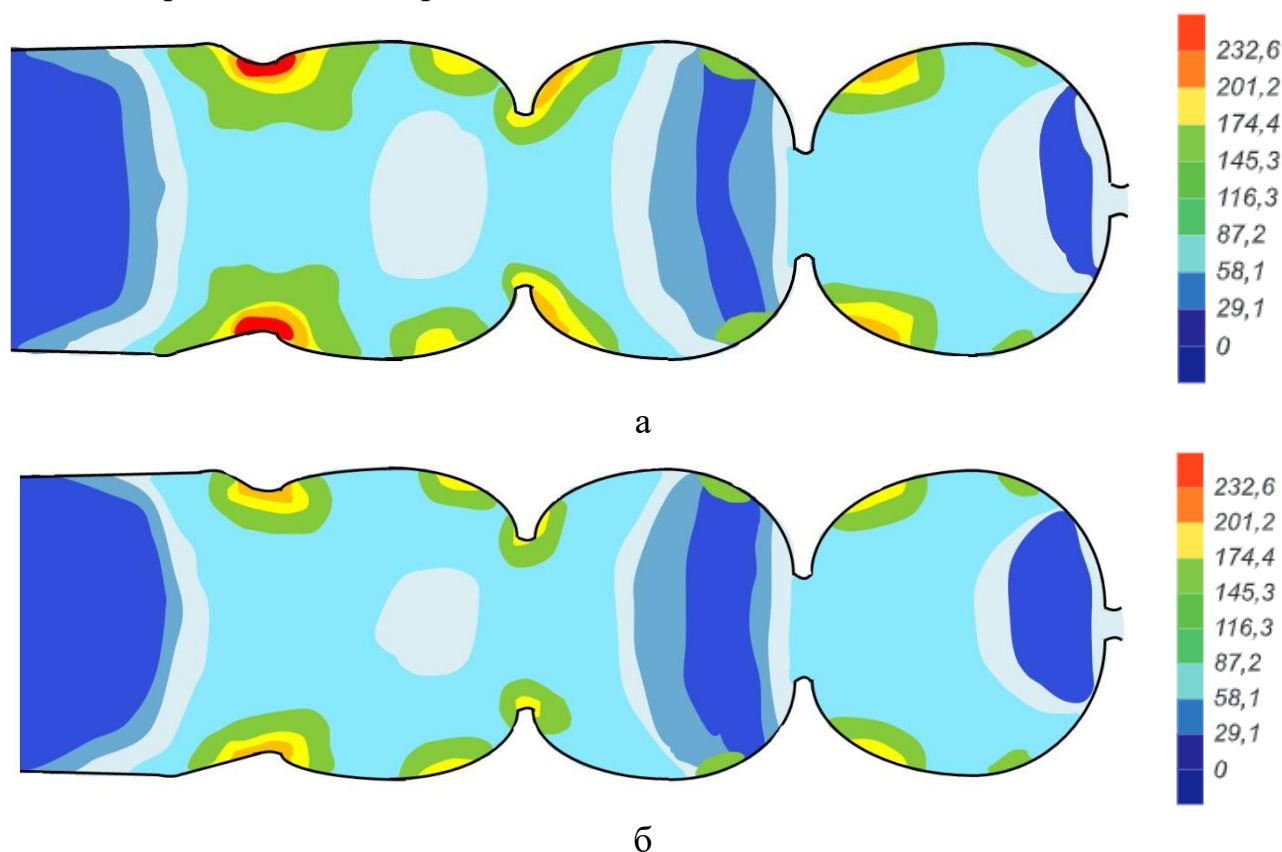


Рисунок 2 – Распределение интенсивности напряжений по поверхности мелющих шаров в процессе прокатки при температуре нагрева исходных заготовок 880°С (а) и 1000°С (б)

С целью обоснования оптимальной температуры прокатки мелющих шаров по критериям энерго-, материало- и металлосбережения использован интегральный показатель:

$$K_{\text{инт}} = a_{\text{эл}} \cdot \Delta P_{\text{эл}} + a_{\text{т}} \cdot \Delta P_{\text{т}} + a_{\text{в}} \cdot \Delta P_{\text{в}} + a_{\text{уг}} \cdot \Delta P_{\text{уг}} + a_{\text{бр}} \cdot \Delta P_{\text{бр}}, \quad (4)$$

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; $P_{\text{уг}}$, $\Delta P_{\text{бр}}$ – 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 на интегральный показатель; $a_{\text{уг}}$, $a_{\text{бр}}$ – весовые коэффициенты, учитывающие степень влияния потерь металла в виде угара и окалины в процессе нагрева заготовок и брака мелющих шаров соответственно на интегральный показатель.

Величины весовых коэффициентов определены исходя из величин затрат или потерь в стоимостном выражении, размеров сопутствующих дополнительных расходов и существующих технических ограничений работы шаропрокатного стана. 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). Значения показателей, соответствующих конкретным температурам выдачи заготовок под прокатку, определяли по уравнениям, полученным на основании статистической обработки данных текущего производства.

Исходя из представленной методики расчета оптимальным температурным интервалом выдачи заготовок под прокатку является интервал, соответствующий минимальному значению интегрального показателя, составляющий 980°C и выше (рисунок 3).

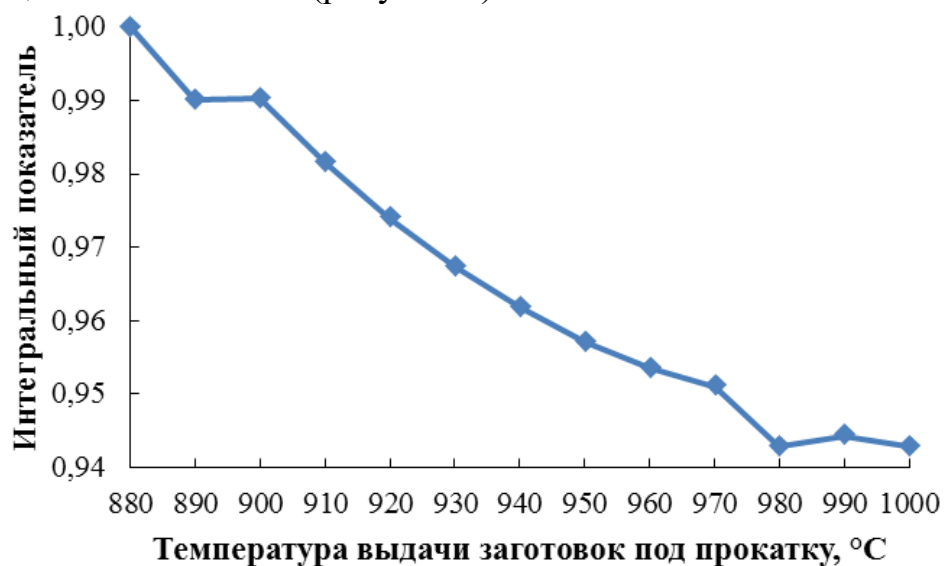


Рисунок 3 – Влияние температуры выдачи заготовок под прокатку мелющих шаров на интегральный показатель ресурсо-, материало- и металлосбережения

Опытно-промышленное опробование режима прокатки мелющих шаров из стали Ш2.3 с повышенной температурой выдачи заготовок под прокатку усовершенствованного химического состава показало снижение отбраковки мелющих шаров, как по показателям твердости, так и по ударной стойкости суммарно на 2,9%, при одновременном уменьшении удельного расхода электроэнергии на прокат на 9 кВт•ч/т и удельного расхода прокатных валков на 0,12 кг/т, что подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

Третья глава посвящена обоснованию оптимального химического состава и исследованию деформационных характеристик экспериментальных сталей для производства мелющих шаров высокой твердости поверхности с нормированной объемной твердостью (5 группа твердости по ГОСТ 7524-2015), одновременно обладающих повышенной ударной стойкостью.

Для разработанных пяти вариантов химического состава сталей, микролегированных ванадием (таблица 3), проведены лабораторные экспериментальные исследования, направленные на определение закономерностей формирования микроструктуры по основным технологическим этапам производства, соответствующим реальным условиям промышленного производства катаных мелющих шаров: нагрев под прокатку,

прокатка, термообработка.

В качестве объекта исследований использовали лабораторные слитки диаметром 6,2 мм, выплавка стали для которых производилась в индукционной печи емкостью 10 кг. Стальные слитки указанных вариантов химического состава (таблица 3) нагревали в муфельной печи и прокатывались на автоматизированном лабораторном прокатном стане «ДУО-130», после чего подвергались закалке и отпуску. При проведении экспериментальных лабораторных исследований не ставилась задача физического моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки мелющих шаров, так как целью являлось определение основных закономерностей изменения микроструктуры стали в процессе деформации и последующей термообработки для выбранных вариантов химического состава стали. Поэтому ограничились процессом продольной прокатки лабораторных слитков в круглом калибре.

Таблица 3 – Химический состав экспериментальных сталей для производства мелющих шаров высокой твердости поверхности с нормируемой объемной твердостью

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	Не более 0,015	Не 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		

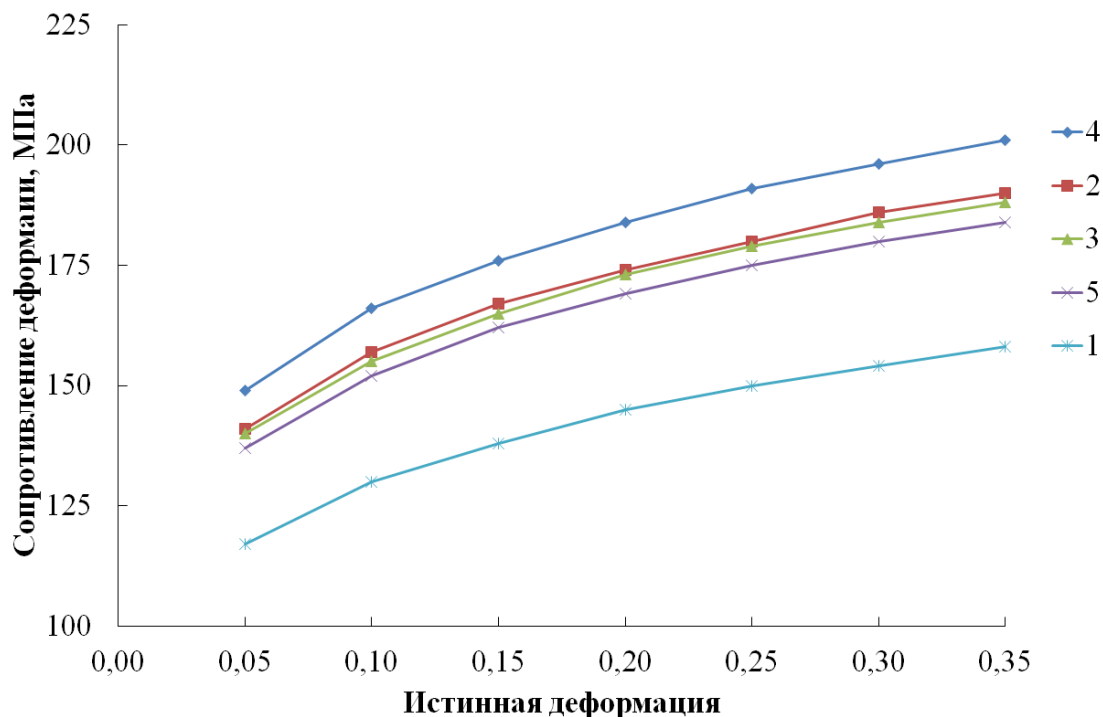
Для образцов, отобранных от лабораторных слитков, проводили анализ микроструктуры в исходном (литом) состоянии, а также после каждого технологического этапа. Кроме того после всех этапов проводили замер поверхностной твердости раскатов, а для раскатов после отпуска проводили анализ твердости на глубине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

По результатам исследований установлено, что оптимальной однородной микроструктурой обладают образцы вариантов химического состава №1 и №5 и при этом для всех разработанных вариантов экспериментальных сталей уровень поверхностной и объемной твердости раскатов после термообработки соответствует требованиям для 5-ой группы по ГОСТ 7524-2015.

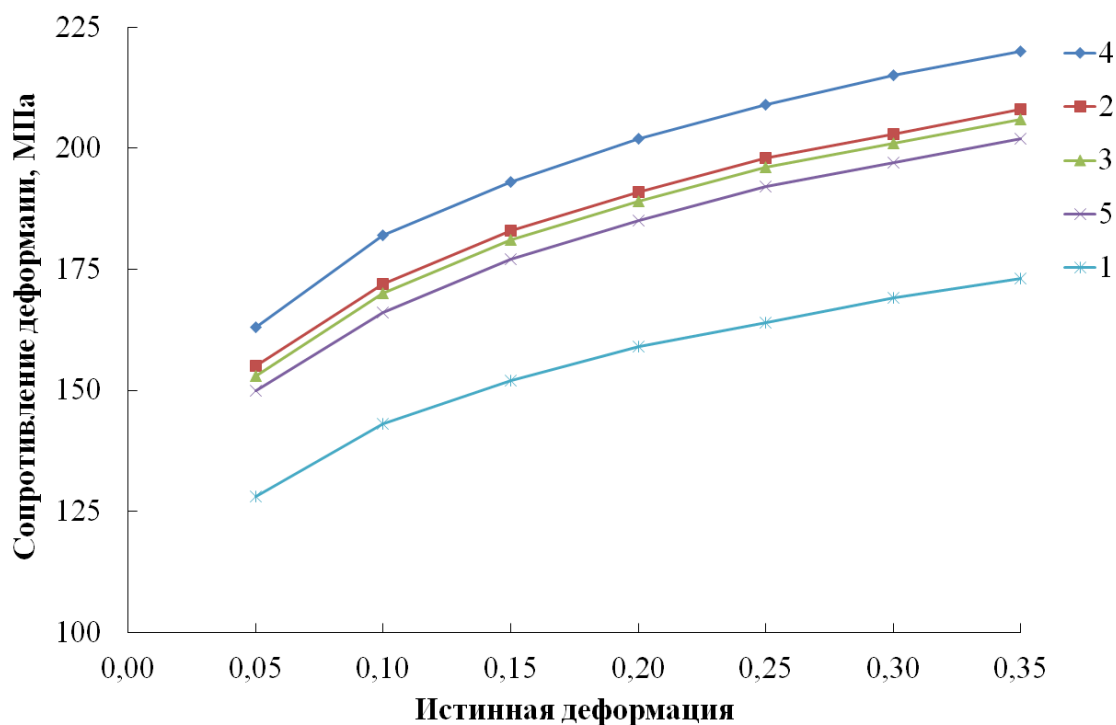
Далее с целью определения технологичности и эффективности применения экспериментальных сталей для производства мелющих шаров проведены исследования сопротивления пластической деформации рассматриваемых сталей. Исследования проводились на лабораторной установке методом горячего кручения образцов. Интервал варьирования параметров деформации при проведении экспериментальных исследований соответствовал диапазону их изменения при прокатке мелющих шаров и заготовок 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⁻¹.

По результатам проведенных исследований получены кривые течения, примеры которых для минимальной и максимальной температур прокатки в рамках выбранного интервала представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.



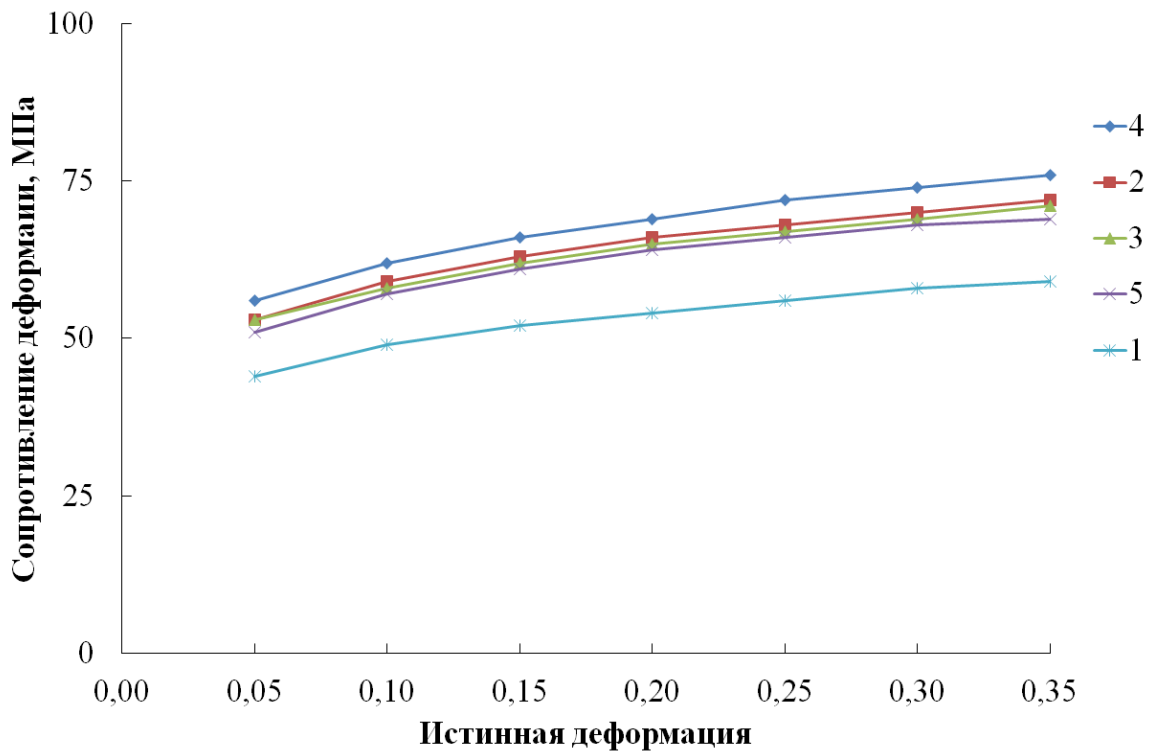
а



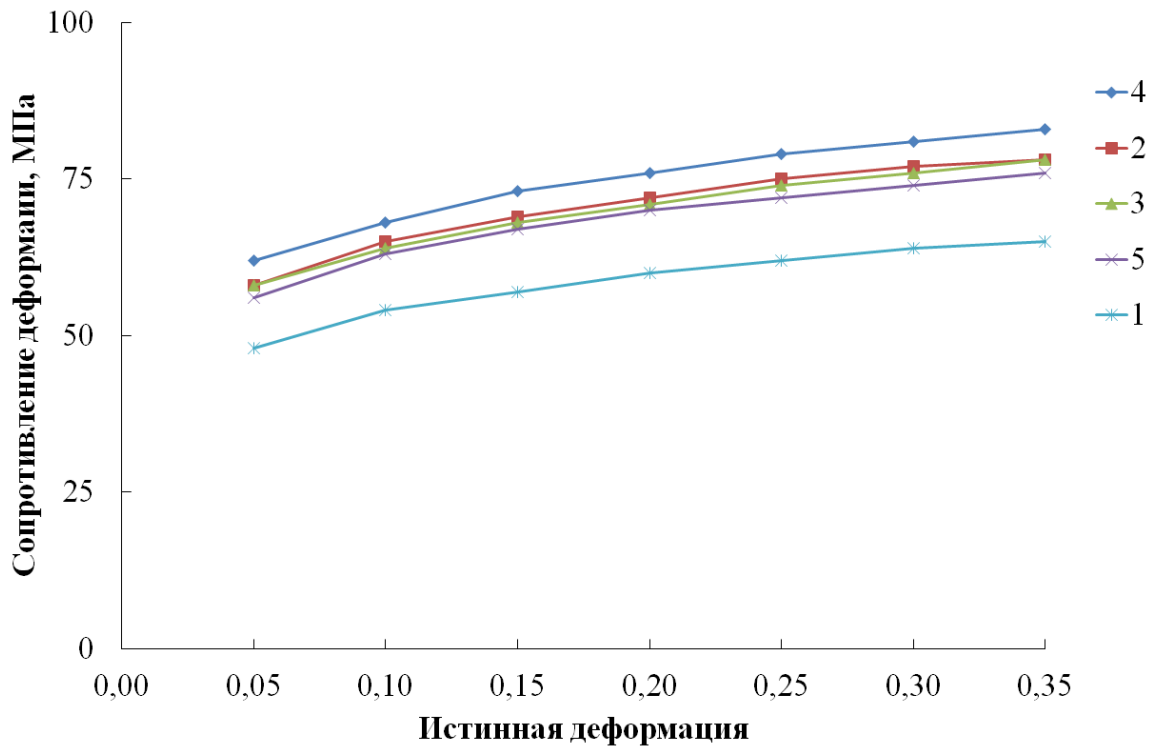
б

1-5 – варианты химического состава экспериментальных сталей согласно таблицы 3

Рисунок 4 – Кривые течения сталей экспериментального состава для производства мелющих шаров при температуре деформации 900°C и скорости деформации 1 с⁻¹ (а) и 10 с⁻¹ (б)



а



б

1-5 – варианты химического состава экспериментальных сталей согласно таблицы 3
 Рисунок 5 – Кривые течения сталей экспериментального состава для производства мелющих шаров при температуре деформации 1200°C и скорости деформации 1 с⁻¹ (а) и 10 с⁻¹ (б)

По полученным данным для всех рассматриваемых сталей имеет место аналогичный характер зависимостей сопротивления пластической деформации от параметров деформации. Установлено, что увеличение истинной

деформации в рассматриваемом интервале изменения данного параметра приводит к повышению сопротивления деформации всех сталей по нелинейному закону. Повышение скорости деформации и, в особенности, снижение температуры деформации, приводит к значимому увеличению сопротивления сталей деформированию по нелинейному закону при аналогичных значениях истинной деформации.

Сравнительный анализ сопротивления деформации рассматриваемых экспериментальных сталей показал, что при аналогичных условиях деформации заметно более низким сопротивлением деформированию по отношению к остальным сталям обладает сталь варианта №1, а наибольшим из рассматриваемых сталей сопротивлением деформации обладает сталь варианта химического состава №4.

На основании комплекса проведенных исследований разработана экспериментальная сталь марки Ш76ХФ для прокатки мелющих шаров повышенной поверхностной и объемной твердости с высокими показателями ударной стойкости (таблица 4).

Таблица 4 – Химический состав экспериментальной стали Ш76ХФ

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

Обобщение полученных результатов экспериментальных исследований позволило определить закономерности влияния содержания углерода и легирующих элементов в сталях на их сопротивление пластическому деформированию. Определено, что увеличение содержания углерода, марганца, хрома и никеля в сталях оказывает значимое влияние на повышение их сопротивления пластическому деформированию.

Получено уравнение регрессии, устанавливающее количественную взаимосвязь сопротивления деформации сталей для производства мелющих шаров с их химическим составом и параметрами прокатки:

$$\sigma_s = K_v \cdot (4032[C] + 336[Mn] + 546[Cr] + 364[Ni]) \cdot e^{-3,255\left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,153} \cdot u^{0,004}, \quad (4)$$

где σ_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; ε – истинная деформация; u – скорость деформации, c^{-1} .

Адекватность уравнения регрессии подтверждена при прокатке мелющих шаров и заготовок из стандартных и экспериментальных сталей в условиях промышленного шаропркатного и сортовых станов.

В четвертой главе приведены результаты разработки и опытно-

промышленного опробования в условиях промышленного производства режимов прокатки и термомеханической обработки мелющих шаров диаметром 100 мм высокой твердости поверхности с нормируемой объемной твердостью (5 группа твердости по ГОСТ 7524-2015) из стали экспериментальной марки Ш76ХФ.

На основании результатов компьютерного моделирования напряженного состояния металла при поперечно-винтовой прокатке шаров разработана калибровка валков с непрерывно изменяющимся шагом реборды (рисунок 6).

По полученным в ходе компьютерного моделирования данным использование новой калибровки валков позволяет уменьшить величину максимальных напряжений в зонах внедрения реборды в заготовку в 1,14-1,23 при производстве шаров диаметром 100 мм из стали Ш76ХФ (рисунок 7). При этом напряжения, возникающие при прокатке шаров из стали Ш76ХФ по новой калибровке, незначительно выше напряжений при прокатке шаров из стандартной стали по существующей калибровке.

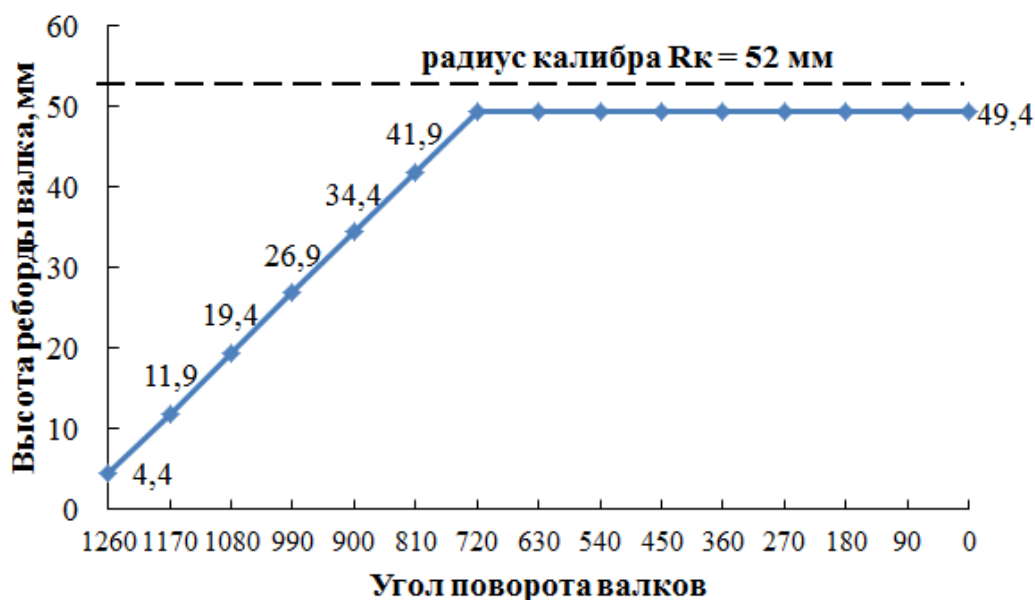


Рисунок 6 – Схема нарезки калибров для прокатки шаров диаметром 100 мм

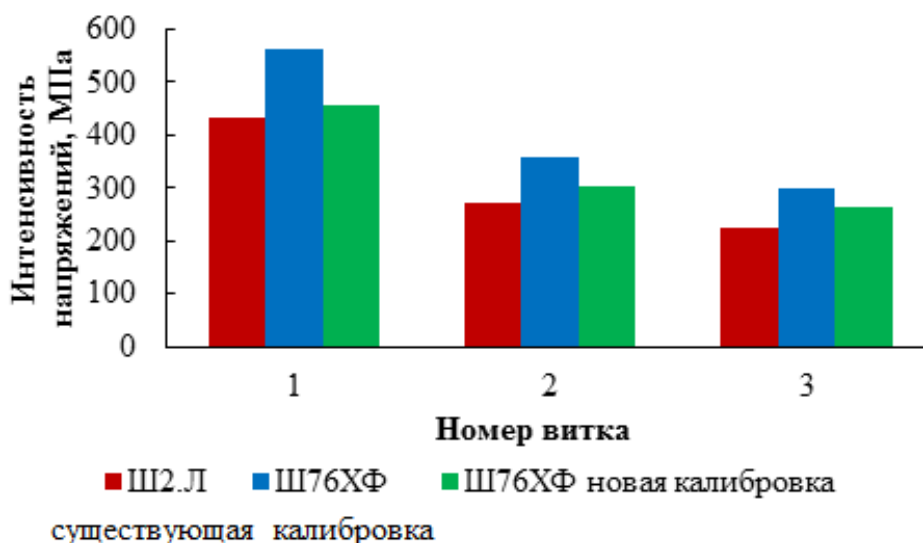


Рисунок 7 – Интенсивность напряжений при прокатке шаров диаметром 100 мм с использованием различных калибровок

По результатам опытно-промышленного опробования новой калибровки подтверждено снижение нагрузки на прокатные валки. Зафиксировано снижение удельного расхода прокатных валков на 22% и 18% для шаров из стандартной стали и экономнолегированной стали Ш76ХФ соответственно (таблица 5) за счет снижения интенсивности износа реборд.

Таблица 5 – Удельный расход прокатных валков для прокатки шаров диаметром 100 мм при использовании различных калибровок

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

На основании исследований особенностей микроструктуры мелющих шаров диаметром 100 мм из стали Ш76ХФ при варьировании параметров их термомеханической обработки определены оптимальная температура прокатки мелющих шаров, составляющая $1050 \pm 20^\circ\text{C}$ и рекомендуемая температура охлаждающей воды при их закалке – не более 25°C .

Опытно-промышленное опробование производства мелющих шаров диаметром 100 мм из экономнолегированной стали Ш76ХФ с использованием разработанных технологических рекомендаций по режимам прокатки и термообработки показало соответствие готовых шаров требованиям ГОСТ 7524-2015 для 5 группы твердости и их повышенную ударостойкость, что подтверждено Справкой об использовании результатов диссертации в производстве.

Заключение

1. На основании комплекса исследований, проведенных для условий промышленного шаропркатного 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 ($880-1000^\circ\text{C}$) 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 шаропркатном 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, опытнo-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.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Байдин, В. В.** Моделирование и разработка технологических режимов производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости // **В. В. Байдин**, А. А. Уманский, // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2025. – Т. 68. – №3. – С. 218-227.
2. 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.
3. 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.

Публикации в журналах и сборниках трудов

4. **Байдин, В. В.** Разработка и совершенствование технологии производства катаных мелющих шаров повышенной твердости и ударостойкости / **В. В. Байдин** // Сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки: проблемы и перспективы в контексте глобальных вызовов. – Анапа: НИЦ ЭСП в ЮФО, 2025. – С. 5-10.
5. Уманский, А. А. Исследования и оптимизация химического состава стали для производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости / А. А. Уманский, **В. В. Байдин** // Сборник трудов XVIII Международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла «От руды до стали». – Санкт-Петербург: Завод «АЭМ-Спецсталь», 2025. – С. 157-161.
6. Уманский, А. А. Экспериментальные исследования сопротивления пластической деформации легированных сталей для производства мелющих шаров / А. А. Уманский, **В. В. Байдин** // Труды XXIV Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк, 2024. – С. 172-174.
7. Уманский, А. А. Исследования сопротивления пластической деформации сталей экспериментального химического состава для производства мелющих шаров / А. А. Уманский, **В. В. Байдин** // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2024. – №26. – С. 43-51.
8. Уманский, А. А. Основы комплексной технологии производства мелющих шаров повышенных групп твердости / А. А. Уманский, **В. В. Байдин** // Труды XXIV Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк, 2024. – С. 174-177.

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

Подписано в печать 2025. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в Издательском центре СибГИУ

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н,
ул. Кирова, зд. 42