

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

На правах рукописи



РУБЦОВ Виталий Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ
ПРОКАТКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ
ШАРОВ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ШЕВЧЕНКО Олег Игоревич

Официальные оппоненты: **ВАВИЛКИН Николай Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
пенсионер, г. Москва;

Барышников Михаил Павлович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, профессор кафедры
«Технологии обработки материалов»;

Радионова Людмила Владимировна,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)»,
г. Челябинск, заведующий кафедрой
«Процессы и машины обработки металлов
давлением».

Защита состоится «10» июня 2021 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УРФУ 05.04.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2177>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно приоритетным направлениям развития черной и цветной металлургии, из распоряжения Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р «Об утверждении Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности РФ до 2024 г. и на период до 2035 г.», в ближайшие годы планируется их значительный рост. В процессе переработки руды одним из основных этапов является её измельчение в шаровых мельницах. В связи с этим, расширяется объем производства мелющих шаров. За последние годы запущены в эксплуатацию шаропрокатные станы: в Череповце «Северсталь», Павлодаре «KSP Steel», Сухом Логу «УГМК», Нижнем Тагиле «ЕВРАЗ-НТМК». На сегодняшний день в мире функционируют более 40 шаропрокатных станков. Большинство из них находятся на территории России и стран СНГ и были введены в эксплуатацию в 60-е гг. XX века. Технологии получения шаров, применимые на данных станах, морально устарели, не отвечают современным требованиям и в большинстве своем требуют замены или модернизации оборудования.

Поэтому **актуальной** проблемой на сегодняшний день является совершенствование режимов поперечно-винтовой прокатки, а также калибровок шаропрокатных валков и технологий производства для повышения: качества производимых шаров, увеличения энергоэффективности процессов, снижения трудовых ресурсов и минимизации влияния человеческого фактора на процесс производства. Это требует глубокого научного подхода, основанного на тенденциях современной науки и техники, включающего повышение технологичности производственного процесса, улучшение технических характеристик существующего оборудования и обоснование процессов, материалов, устройств и режимов предложенных вновь.

Степень разработанности темы исследования. Развитие теории поперечно-винтовой прокатки коротких тел целиком основывается на работах А.И. Целикова и С.П. Грановского, заложивших фундаментальные основы расчетов для калибровок шаропрокатных валков, которые впоследствии усовершенствовались такими учеными, как В.И. Котенок, К.Л. Разумов-Раздолов, а также исследовались и были применены на практике группой ученых из Новокузнецка во главе с В.Н. Перетяtko, авторами из Люблинского технологического университета во главе с Z. Pater и специалистами из КНР. Развитие науки и техники в других областях приводит к непрерывному совершенствованию современного прокатного и металлорежущего оборудования, в связи с этим требуется адаптация существующих методик, конструкций, в том числе калибровок валков, технологий производства шаров и пр.

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

Основные задачи диссертационного исследования, которые необходимо решить для ее достижения:

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

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

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

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

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

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

Впервые произведено моделирование прокатки шаров в программе Deform-3D с использованием валков с непрерывно-изменяющимися параметрами. Доказана возможность использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-

изменяющимися параметрами с высокой степенью достоверности результатов моделирования по геометрическим и энергосиловым параметрам.

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

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

Впервые разработаны модели энергоэффективных калибровок для валков с переменными параметрами (непрерывно-изменяющимся шагом по функциональным зависимостям, переменной глубиной впадины), которые обеспечивают постоянное прилегание заготовки к валкам и создают более равномерное распределение удельных контактных давлений по поверхности шара.

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

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

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

Определение геометрических параметров проводилось как на стандартном оборудовании, так и при помощи специальных пространственных измерителей («FARO ARM» и 3-D сканер) с применением методов допускового контроля и учетом погрешностей инструментов и методов измерения. Контроль физических величин производился на метрологически-аттестованном оборудовании с использованием систем автоматики, измерительных инструментов и стационарных приборов (тепловизора «Fluke Ti 400», твердомера «МЕТОЛАБ 703», металлографического микроскопа «Leica MEF4A» и т.д.).

На защиту выносятся: результаты комплексных исследований режимов поперечно-винтовой прокатки, обеспечивающие получение мелющих шаров высокого качества;

- характер, степень и распределение износа по длине шаропрокатных валков. Влияние конструктивных элементов проводок на их износ;

- скоростные режимы прокатки с автоматически-изменяемой частотой вращения в момент захвата заготовки;

- новые калибровки шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимися параметрами (с непрерывно изменяющимся шагом и постоянной или линейно-увеличивающейся толщиной реборды, а также с переменной глубиной впадины).

- 3-D модель процесса прокатки в программе Deform-3D, использующая валки с непрерывно-изменяющимися параметрами, показавшая высокую степень сходимости результатов моделирования по геометрическим и энергосиловым параметрам с результатами промышленного эксперимента.

- прикладные исследования по совершенствованию технологических режимов производства мелющих шаров: оперативный контроль оптимизации настроек стана, определение прокаливаемости шаров в On-line режиме и совершенствование технологии производства: уменьшение расхода металла, повышение качества мелющих шаров.

- результаты производственного эксперимента, обеспечивающие получение шаров 5 группы твердости в условиях стана 60-120.

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

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

Достоверность разработок, предложенных в диссертационной работе, подтверждает их внедрение и использование на промышленных площадках:

- внедрение переменной частоты вращения валков на стане 80-125 АО «ЕВРАЗ-НТМК» и фактическое увеличение за 2019 год ресурса валков до 1960 т с одной переточки вместо 1800 т за 2018 год (Акт соответствия и акт использования изобретения 2723342 от 07.08.2020);

- изготовление шаропрокатных валков на фрезерном 5-координатном обрабатывающем центре с непрерывно-меняющимся шагом, взамен токарно-винторезных станков (Акт о результатах опытной прокатки от 30.04.2018г.)

- увеличение объемов производства ШПС за счет снижения плановых простоев по замене проводок с суммарным экономическим эффектом за 2019 год в размере 10,82 млн. рублей (п.2. Акт о результатах внедрения инициатив на участке ШПС от 23.09.2020г.);

- внедрение режимов настройки стана, повлиявших на увеличение стойкости валков и увеличение производства ШПС с суммарным

экономическим эффектом за 2019 год в размере 22,33 млн. рублей (п. 1. Акт о результатах внедрения инициатив на участке ШПС);

- получение устойчивых процессов изготовления мелющих шаров 5 группы твердости из марки стали: 70ХГФН-2 (патент №2745922 от 04.08.2020 г).

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

Публикации. По результатам работы опубликовано 30 статей, в том числе 9 статей в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 4 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 189 страницах текста, включает 66 рисунков, 15 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 157 наименований и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** представлен анализ литературы по проблематике исследования. Описаны особенности технологического процесса производства мелющих шаров и периодических профилей методом поперечно-винтовой прокатки. На основании выполненного обзора, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава сфокусирована на повышении ресурса инструмента деформации шаропрокатных станов, в том числе, исследовании причин, видов износа, распределения износа по поверхности инструмента деформации и разработке мероприятий по увеличению стойкости шаропрокатных валков и проводок.

Исследования износа прокатного инструмента были проведены в условиях производственного эксперимента при производстве шара условным диаметром 120 мм как профиля, при прокатке которого создаются максимальные усилия и деформации. Исследования были выполнены в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» на шаропрокатном стане 80-125 и на шаропрокатном стане 60-120 с принципиально отличающимися калибровками.

Наиболее подвержены износу две области – зона захвата заготовки (что ярко выражено на валках стана 80-125 (рис.1)) и зона скрещивания валков (характерно для валков стана 60-120 (рис.2)). В этих зонах износ достигает предельных значений в первую очередь. Зона наиболее интенсивного износа шаропрокатных валков зависит от толщины реборды, где для стана 80-125 значение толщины реборды в зоне захвата составляет 3,99 мм, в зоне скрещивания валков – 18,68 мм, а для стана 60-120 толщина реборды в зоне захвата – 49,5 мм, в зоне скрещивания валков – 9,5 мм.

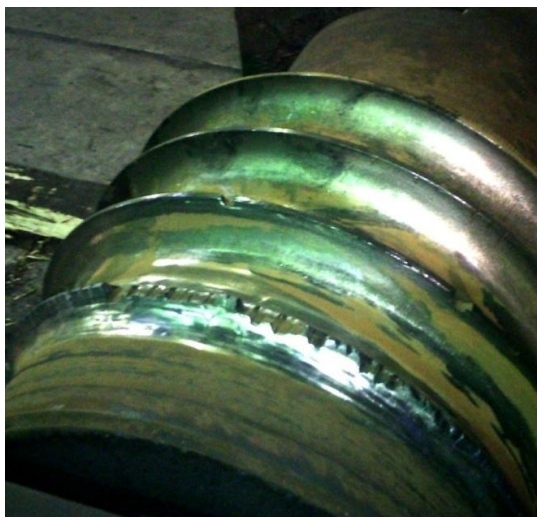


Рис. 1. Вид изношенной поверхности и разрушения реборд валков в зоне захвата



Рис. 2. Вид изношенной поверхности в зоне скрещивания

Выявлено, что степень износа как для валков, так и для проводок интенсивно возрастает по мере самого износа. На рис. 3 и 4 изображены графики линейного износа реборд (в зоне захвата заготовки - для стана 80-125 (рис.3) и в зоне скрещивания валков – для стана 60-120 (рис.4)), до их предельного износа (после которого появляются недокаты в виде «рейки» или «гирлянды» для станов 80-125 и 60-120 соответственно).

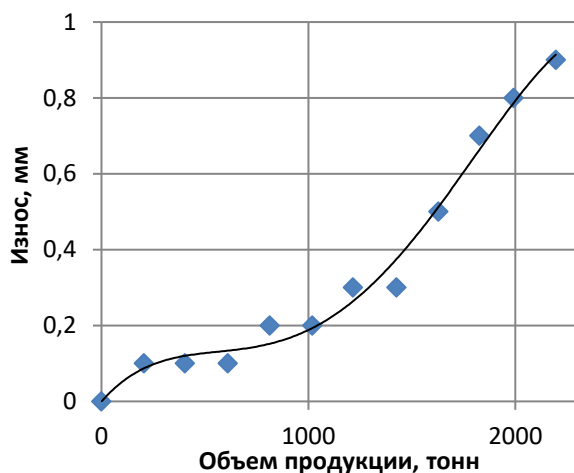


Рис.3. Линейный износ реборд валков в зоне захвата заготовки (мм) в условиях стана 80-125

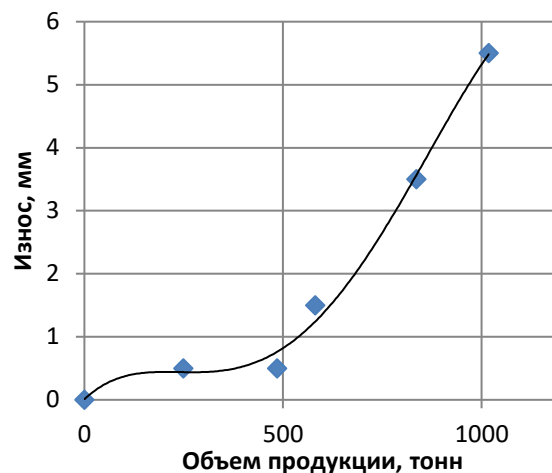


Рис.4. Линейный износ реборд валков в зоне скрещивания валков (мм) в условиях стана 60-120

Также установлено, что износ прокатного инструмента и привалковой арматуры оказывает влияние на рост усилия прокатки. На рис.5 представлена сравнительная характеристика усилия прокатки за весь ресурс работы комплекта валков.

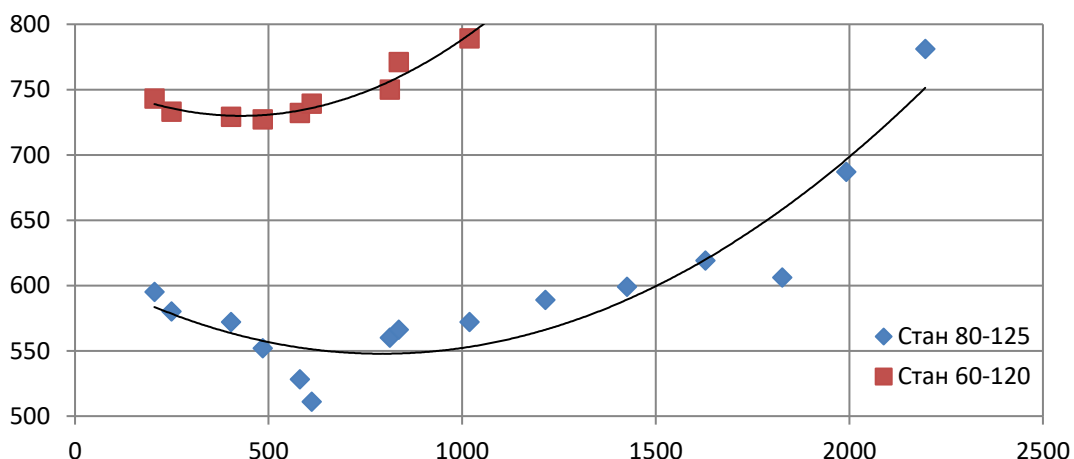


Рис.5. Усилия прокатки за весь ресурс работы комплекта валков

Семейство кривых, полученных на рис. 5, показывает, что нагрузки на двигатель вытекают из процессов износа, где примерно $1/4$ периода жизни валка происходит приработка валков и падение нагрузок, после чего износ валков приводит сначала к замедленному, а затем по прохождению $3/4$ объема прокатной кампании к интенсивному росту нагрузки. Максимальные значения суммарной нагрузки в обеих применяемых калибровках примерно одного порядка (750-800 кН), поэтому калибровка, имеющая большую энергоэффективность на новых валках, приведёт к существенному увеличению их ресурса. Следовательно, наиболее предпочтительной будет калибровка, при которой толщина реборды увеличивается от зоны захвата к зоне скрещивания, при этом толщина реборды не должна быть ниже минимальных значений, отвечающих прочностным и эксплуатационным

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

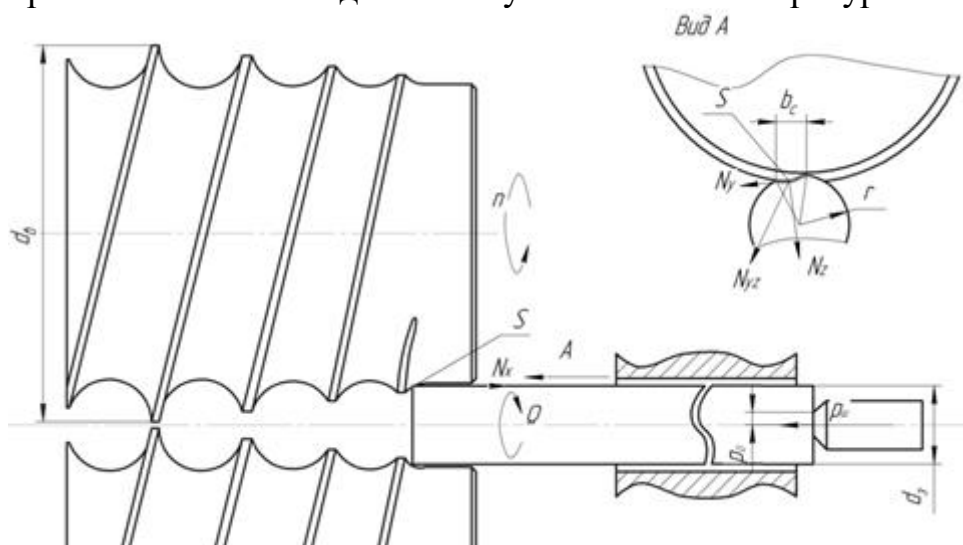


Рис. 6. Схема действия сил и ускорение заготовки в момент захвата.

Особое внимание в главе 2 уделено повышению стойкости валков за счет применения переменной частоты вращения. Исходя из условия захвата заготовки, определяющим параметром является окружное ускорение Ω (рис.6). Для определения степени влияния на динамические нагрузки, из окружного ускорения и уравнения суммы моментов была выражена допустимая частота вращения валков:

$$n = \frac{30d_3t_{раз}(2pSr [\mu m_m - \frac{1}{2}(1+i)\gamma] - \frac{4}{3}\pi p_{ш}f\rho_0^3)}{d_6\pi G}. \quad (1)$$

где r - радиус заготовки, м

d_3 - диаметр заготовки, м

μ - коэффициент трения при вращении заготовки,

$t_{раз}$ - время разгона заготовки до рабочей частоты вращения,

m_t - проекция вектора для равнодействующей силы трения,

i - отношение радиуса заготовки и рабочего радиуса валка, $r_3/r_6 = d_3/d_6$

γ - угол захвата заготовки, $\gamma = b_c/r$

b_c - ширина смятия

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

f - коэффициент внешнего трения,

ρ_0 - текущее значение радиуса задающей штанги, м

G - масса заготовки, кг

p - контактное давление, Па

S - площадь контакта в момент захвата, м².

Для заготовки $\varnothing 60$ мм допустимая частота вращения валков составит $n=71$ об/мин и, соответственно, для $\varnothing 80$ - $n=72$ об/мин, для $\varnothing 100$ -

$n=65$ об/мин, для $\varnothing 120$ – $n=63$ об/мин. По результатам расчета видно, что при увеличении диаметра заготовки, допустимая максимальная частота вращения в момент захвата заготовки изменяется незначительно.

Экспериментальное исследование процесса прокатки, проведенное за весь жизненный цикл валка, подтвердило аналитические расчеты. Наиболее существенное снижение частоты вращения валков в момент захвата необходимо для заготовок меньшего диаметра. Причем по мере развития процессов износа инструмента деформации, требуется еще большее снижение частоты вращения (до 40% от первоначального значения). Например, для заготовки $\varnothing 60$ мм частота вращения на предельно изношенных валках не должна превышать 40 об/мин.

Основываясь на полученных данных, предложено и обосновано использование режимов прокатки с переменной частотой вращения валков, т.е. снижение частоты вращения до допустимой в момент захвата заготовки и постепенный выход на рабочую частоту в установившемся режиме.

В условиях, когда время пауз между заготовками ограничено, возможно использование квадратичной зависимости увеличения частоты вращения валков (рис. 7), при которой время пауз снизится до 2 секунд при сохранении ожидаемого эффекта от снижения контактного давления на реборду.

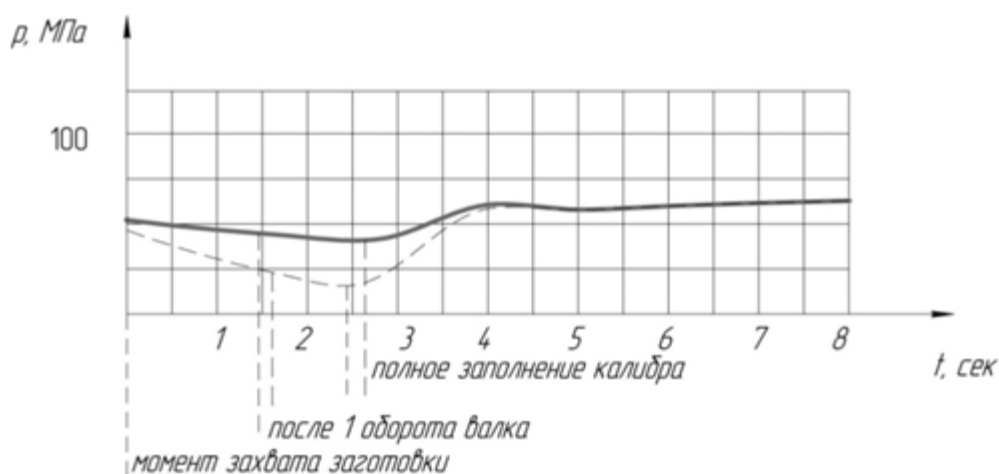


Рис. 7. Значения удельного контактного давления при переменной частоте вращения валков (---) по квадратичному и (—) по линейному закону.

Также было установлено, что износ направляющих проводок зависит от ширины их рабочей поверхности. Уширение рабочей поверхности возможно при увеличении подрезки одного из валков. Апробация аналитической модели была произведена в условиях стана 60-120. Увеличение ширины рабочей части проводок при прокатке шаров условным диаметром $\varnothing 60$ мм, $\varnothing 80$ мм, $\varnothing 100$ мм, $\varnothing 120$ мм до максимально возможных значений 9,5 мм, 14,5 мм, 16,5 мм и 27 мм соответственно, повысило их ресурс.

В третьей главе разработаны перспективные калибровки шаропрокатных валков, аналитически описаны кривые, являющиеся образующими для элементов калибровки. При калибровке шаропрокатных валков применяются четыре изменяющихся параметра (T_i , H_i , B_i и S_i) (рис.8).



Рис.8. Модель шаропрокатного вала

Для роста реборды ΔH наиболее рациональным будет линейный закон, толщина реборды B имеет подчиненный характер. Значения ΔT шага и ΔS развалки калибра рационально использовать непрерывно-изменяющимися.

Предлагается исследовать зависимость непрерывного изменения шага шаропрокатных валков. После составления уравнений, используя объемы фигур, ограниченных ребордами и соединяющими их перемычками, и проведения ряда упрощений, были выведены функции определения шага для валков с непрерывно-изменяющимся шагом с постоянной (2) и линейно-увеличивающейся (3) толщиной реборды с выполнением условия сохранения постоянства секундных объемов.

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

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

Используя формулы 2, 3, возможно определить теоретический шаг на любом угле поворота валков для калибровки с постоянной или переменной шириной реборды при непрерывно меняющемся шаге. Оба уравнения представляют собой характеристическое уравнение кривой 2-ого порядка по типу $y^2 = f(ax^2 + bx + c)$. В связи с чем, можно предположить, что для данной кривой применима теорема единственности кривых второго порядка: «Кривая второго порядка вполне определяется пятью своими точками, если никакие четыре из них не лежат на одной прямой, при этом кривая, заданная пятью точками вырождается в том и только в том случае, когда три из заданных точек лежат на одной прямой». Исходя из этого, допускаем нахождение 5 произвольных точек из исходного уравнения, по которым однозначно определится положение кривой.

Экспериментальным доказательством возможности использования кривых второго порядка и достаточности нахождения 5 точек для величины развалки калибра шаропрокатного вала, была построена модель валков с

непрерывно-изменяющейся развалкой из модели валков с дискретно-изменяющимся этим же параметром.

В качестве базовой модели был взят комплект штатных валков для производства шаров условным диаметром 60 мм, с дискретно-изменяющимся шагом и развалкой, изготовленный на токарно-винторезных станках. При помощи 3-D сканера была получена модель (рис.9а), далее в систему были выгружены все геометрические параметры валка и проведен их детальный анализ.

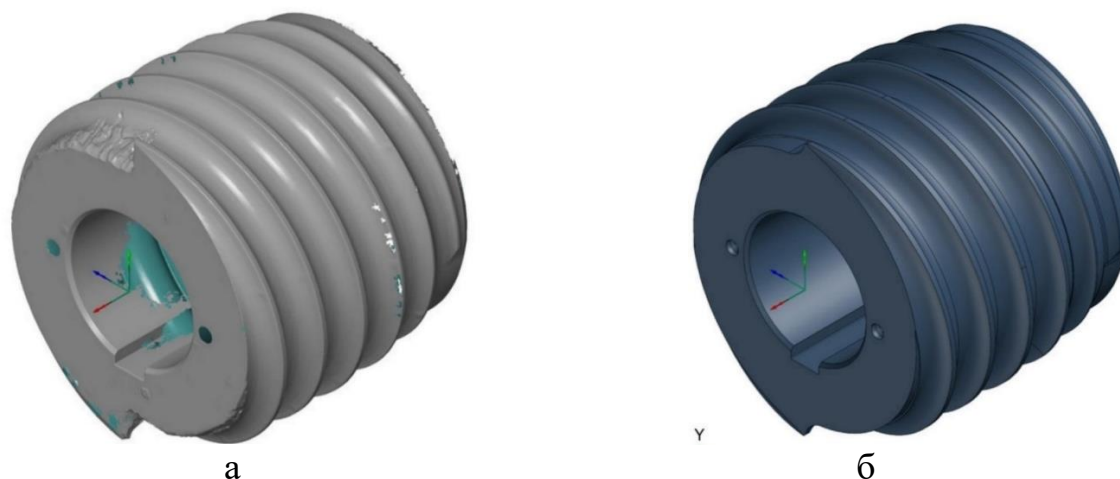


Рис. 9. Модели валка: а. - с 3-D сканера, б – рабочая

Согласно рис. 10 (исходные значения), видно, что на линии присутствуют значительные переломы при угле положения $\varphi=765^\circ$ и далее через каждые 90° . Для сглаживания данной кривой были применены параметры, обусловленные кривой 2-ого порядка, которые представлены на рис. 10 (корректированные значения). Построенная кривая с корректированными значениями пересекается с исходной кривой в 5 точках, что подтверждает её принадлежность к кривым 2-ого порядка.

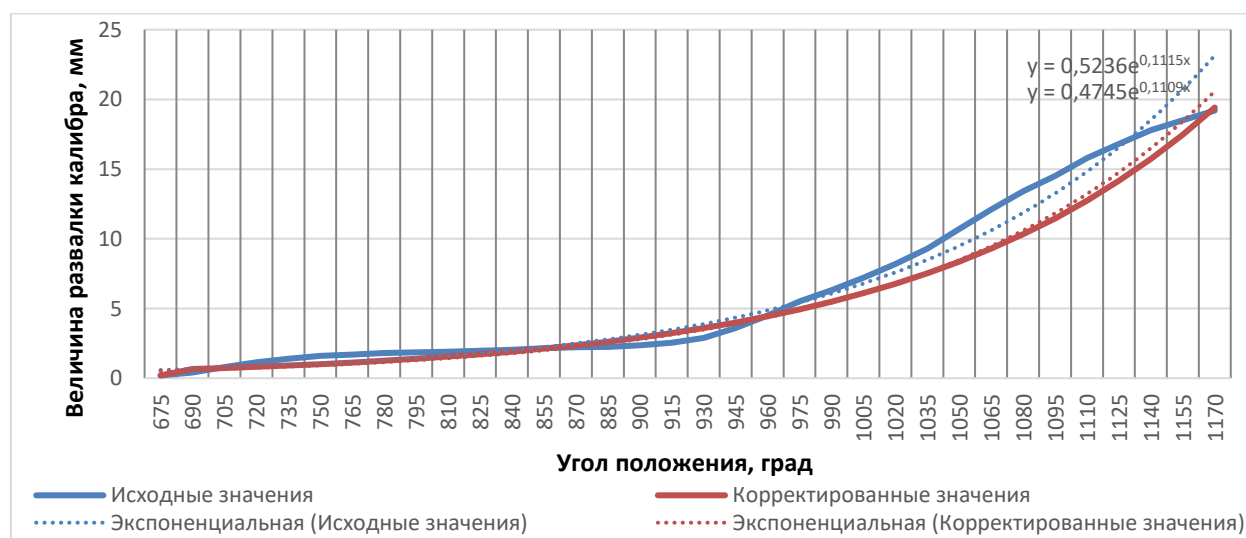


Рис. 10. Параметры развалки калибра S_i , мм

Используя скорректированные значения, отредактирована исходная модель шаропрокатного вала и получена рабочая 3-D модель, предназначенная для 5-координатного обрабатывающего центра (рис.9б).

По результатам данной работы изготовлен комплект валков, прокатаны 2 опытных партии шаров диаметром 60 мм: одна с исходного комплекта валков, вторая с комплекта валков, изготовленного на 5-координатном обрабатывающем центре. При работе на валках с непрерывно-изменяющейся развалкой, нагрузки, снятые с прокатного двигателя, были на 10-15% ниже, чем на исходных валках, уменьшилось количество скачков по нагрузкам.

Применяя уравнения для нахождения шага, была рассчитана калибровка вала для получения шара условным диаметром 120 мм. Использована постоянная толщина реборды, которая составляла 11 мм, по всей длине вала, расчет проводился по формуле (2). По 5 точкам выстроена кривая с непрерывно-меняющимся шагом, на основе которой построена 3-D модель вала, а затем изготовлен комплект валков для опытной прокатки.

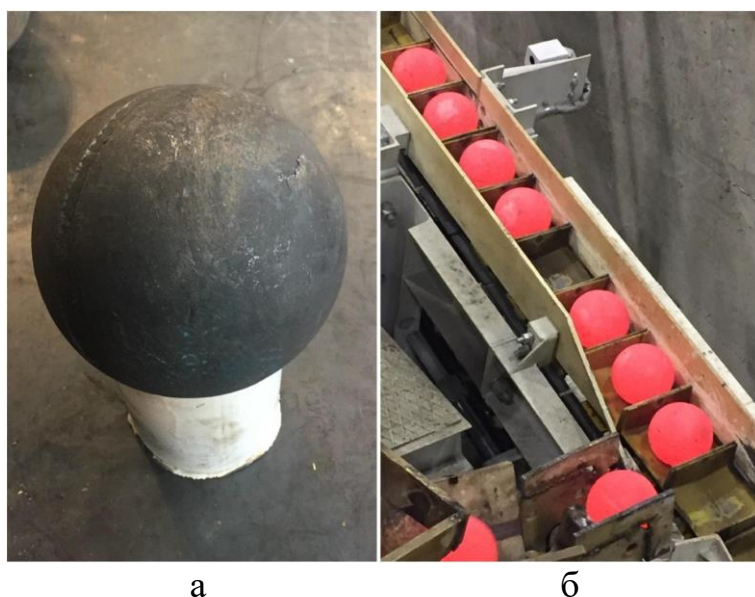


Рис. 11. Шары, полученные на экспериментальной калибровке:
а - проба шара; б - шары на транспортере

Экспериментально установлено, что нагрузка при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом снизилась на 25-35% в отличие от валков с дискретно-меняющимся шагом. После получения оптимальных настроек стана, а также режимов нагрева заготовки и прокатки, геометрия получаемого шара в холодном состоянии, на новых валках, составила $125 \pm 0,4$ мм, что укладывается в требования ГОСТ 7524-2015, на шаре остается незначительный поясok и практически отсутствуют поверхностные дефекты (рис.11).

Используя исходные 3-D модели валков, было проведено моделирование процесса прокатки в программе Deform-3D. Настройка параметров расположения валков выбиралась из вариантов, по которым были достигнуты наилучшие показатели. Результаты моделирования с высокой

долей аппроксимации сошлись с результатами опытной прокатки, включая энергосиловые параметры и геометрию шаров.

Особый интерес представляет процесс формирования концевой обреза – «половинки», характерный для процесса получения мелющих шаров. Критерий разрушения, как видно на рисунке 12а, интенсивно растет при утоньшении перемычки и достигает значений 6,43, а при достижении значения 15,1 на 247 шаге (рис.12б), происходит отделение половинки.

Полученная половинка (рис.13а) по форме идентична половинке, представленной в модели на (рис.13б) на 245 шаге. Как видно, половинка имеет форму вогнутой чаши, что подтверждает сопоставимость с появлением растягивающих напряжений при её формировании. Высокая степень соответствия результатов доказывает дальнейшую возможность использования системы Deform для моделирования процессов прокатки шаров на валках с непрерывно-изменяющимися параметрами с высокой степенью достоверности результатов моделирования.

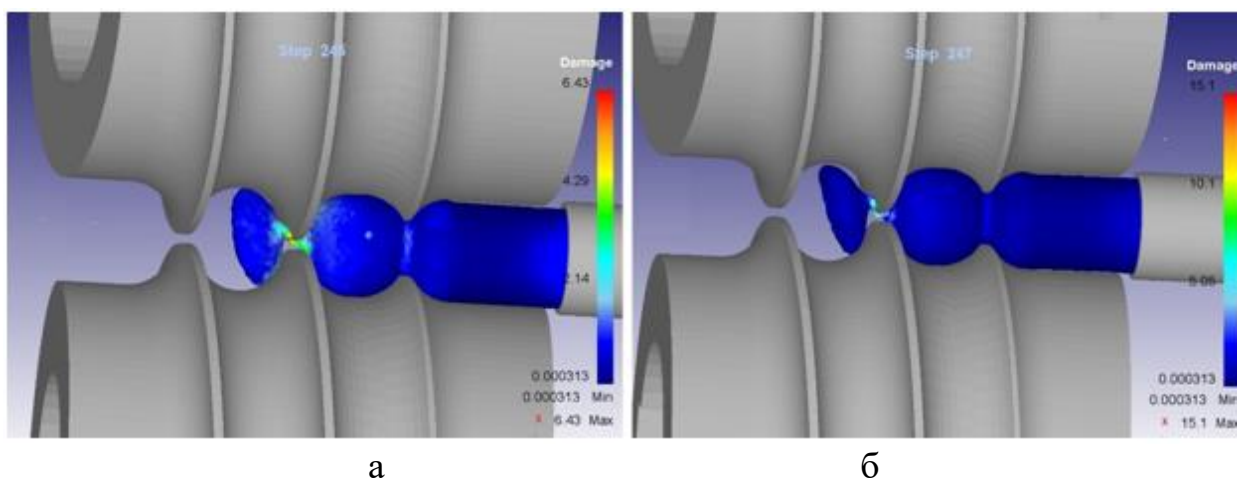


Рис.12. Критерии разрушения при отделении половинки на шагах:
а - 245; б - 247

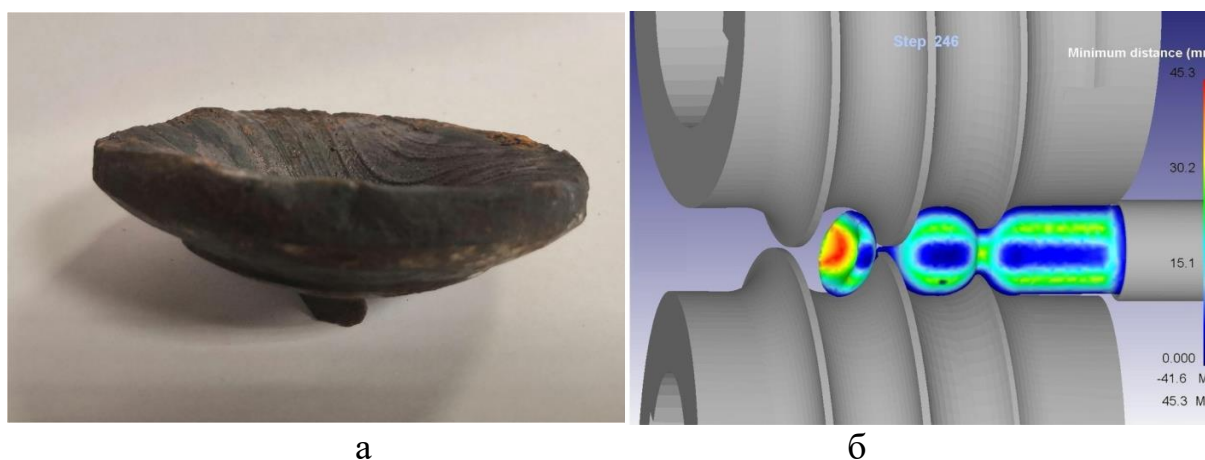


Рис.13. Половинка, полученная: а – при опытной прокатке; б – в результате моделирования

Также в качестве перспективной модели предлагается калибровка валков с переменной глубиной впадины. При такой схеме калибровки

необходимо определять глубину проточки калибров. В калибрах толщина реборды сохраняет постоянную величину. Основной переменной будет изменение глубины впадины витков калибра. Для данной модели была выведена функция изменения шага при линейно-увеличивающейся глубине канавки:

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

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

Для реализации калибровки и производства валков с переменной глубиной впадины, в данной работе были определены возможности применения оборудования с ЧПУ различной конструкции.

В **четвертой главе** на основании систематических исследований предложен комплекс мероприятий по совершенствованию технологических режимов производства мелющих шаров.

1. Определены условия гарантированного захвата заготовки при условии уменьшения концевой обреза с использованием гидравлических толкателей в условиях промышленного эксперимента на шаропрокатном стане 60-120. Установлено, что повышенное давление в толкателе приводит к увеличению размеров половинки, это увеличивает расход металла. Получены минимально-допустимые значения давления в толкателе от 1,1 до 2,1 МПа в зависимости от диаметра заготовки.

2. Используя расчетные формулы приращения температур за счет энергии пластического формоизменения в очаге деформации, предложено аналитически определять распределение удельных усилий по точечным температурам поверхности шара на выходе из клетки.

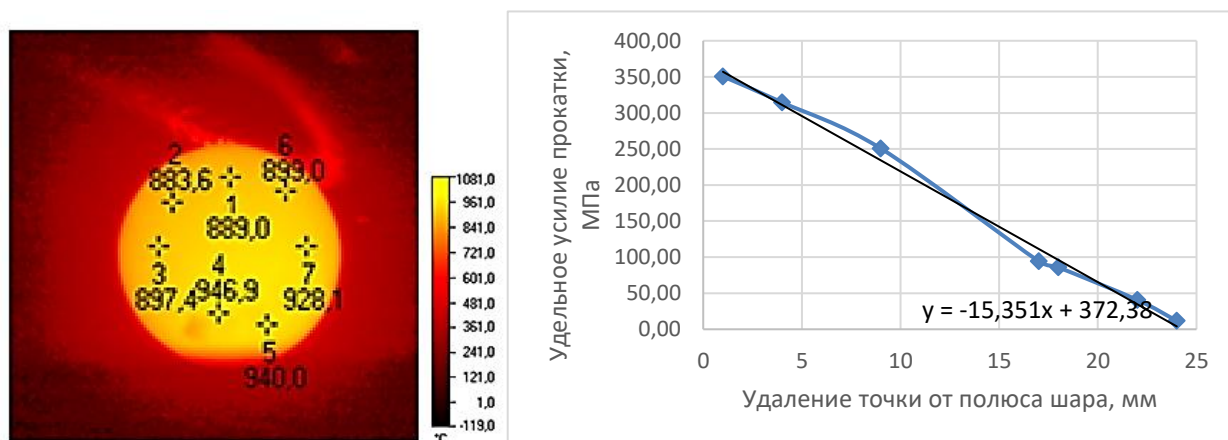


Рис. 14. Температуры на поверхности шара и зависимости распределения удельного усилия прокатки по удалению от полюса

Максимальное удельное усилие прокатки при производстве шара Ø 60 мм составляет 350 МПа и линейно снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации, причем практически сводится к нулю на пояске шара. Визуализация температурных полей в процессе прокатки позволяет оперативно производить настройку стана с обеспечением необходимых геометрических параметров между валками, тем самым снижая локальные напряжения.

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

4. Предложен экспресс-контроль глубины прокаливания мелющих шаров на основании регистрации акустических колебаний. В качестве обобщенного критерия качества, для экспресс-методики предложено использование акустических свойств, возникающих вследствие внешних механических воздействий и находящихся в корреляции с твердостью и глубиной закаливаемого слоя.

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

После этого, на специальном устройстве возбуждения акустических колебаний, поочередно с каждого шара произведено звукоизвлечение с записью параметров звуковых колебаний. Далее шары были разрезаны и проведен замер твердости каждого шара на поверхности, на глубине 1/2 от радиуса шара и в центре шара. Все параметры: твердость, выдержка, частота основного тона в момент атаки звука, представлены в таблице.

Значения частоты основного тона для разных групп шаров имеют достаточно большой диапазон (между 3 и 4 группой составляет более 150 Гц) и могут надежно регистрироваться измерительными приборами и являться критерием для классификации изделий по группам твердости.

Данный способ может быть рекомендован как экспресс - контроль шаропрокатного производства с возможностью оперативного регулирования

технологического процесса закалки и увеличению выхода годной продукции, и быть автоматизирован при установке акустического датчика в технологическую линию.

Таблица. Параметры шаров в опыте

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

5. В рамках производственного эксперимента получены режимы, гарантирующие получение шаров 5 группы твердости для шаров условным диаметром 60-80 мм – стали марки 70ХГФН-2. Впервые в условиях закалки с прокатного нагрева получена 5 группа твердости шаров на больших диаметрах 100-120 мм с использованием сталей марок 75ХГФН и Ш-3Р. Признано более рациональным использование стали Ш-3Р, которая является менее требовательной к деликатности процессов термообработки (рис.15а – отсутствие трещин), а также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость.



Рис. 15. Сравнительный анализ макроструктуры мелющих шаров:
а.- сталь Ш-3Р, б. - 75ХГФН Стрелками обозначены трещины, возникшие в результате термической обработки.

Условия реализации технологических режимов термической обработки мелющих шаров на новом шаропрокатном участке АО «ЕВРАЗ-НТМК»

позволяет получать высокую твердость шаров на марках стали меньшего целевого назначения, что показывает его существенный потенциал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

2. Установлено, что максимальное влияние на контактное давление частота вращения валков оказывает в момент захвата заготовки. Определено, что для заготовки Ø60 мм допустимая частота вращения валков составит 71 об/мин и, соответственно, для Ø80 мм — 72 об/мин, для Ø100 мм — 65 об/мин, для Ø120 мм — 63 об/мин. Наиболее существенное снижение частоты вращения валков в момент захвата необходимо для заготовок меньшего диаметра, а также при работе валков по мере их износа. Так, для валков с предельно-допустимым износом снижение частоты вращения в момент захвата будет достигать 40% от первоначального значения на новых валках. Использование режимов прокатки с переменной частотой вращения валков по линейной или квадратичной зависимости позволяет уменьшить нагрузку на реборду в месте захвата и увеличить ресурс службы валков.

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

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

4. Аналитически получены функции значений непрерывно-изменяющегося шага для шаропрокатных валков с постоянной и линейно-увеличивающейся толщиной реборды при выполнении условия сохранения постоянства секундных объемов; определено, что функциональные зависимости непрерывно-изменяющегося шага и параметров развалки калибра, являются характеристическими уравнениями кривых 2-ого порядка. Это позволяет однозначно определить положение образующей кривой (изменения шага и развалки калибра) по 5 точкам. Составлена методика расчета калибровки и построения 3-D модели шаропрокатных валков с

непрерывно-изменяющимся шагом. При использовании валков с непрерывно-изменяющейся развалкой, нагрузки при прокатке снижаются на 10%, а при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом, на 25-35% в отличие от валков с дискретно-изменяющимися параметрами. Впервые была разработана модель калибровки для валков с переменной глубиной впадины, которая обеспечивает постоянное прилегание заготовки к валкам и создаёт более равномерное распределение удельных контактных давлений по поверхности шара. Для данной модели аналитически были найдены значения изменения шага от изменения радиуса с условием сохранения постоянства объемов.

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

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

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

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

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

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

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

рациональным использование стали Ш-ЗР, которая является менее требовательной к деликатности процессов термообработки, также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость.

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

Перспективой дальнейшей разработки темы является:

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Рубцов В.Ю. Применение переменной скорости вращения валков в поперечно-винтовой прокатке с целью повышения их ресурса / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2017. - № 11 (1415). - С. 72-77; 0,3 п.л. / 0,15 п.л.
2. Рубцов В.Ю. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2018. - № 8 (1424). - С. 58-63; 0,32 п.л. / 0,16 п.л.
3. Rubtsov V.Yu Improvement of Rolling Dynamics to Increase Roller Life in Ball Rolling / **V.Yu. Rubtsov**, O.I.Shevchenko, M.V. Mironova // Steel in Translation. – 2018. – Т. 48. – №12. – pp. 757-761; 0,3 п.л. / 0,1 п.л. (Scopus)
4. Рубцов В.Ю. Распределение температурных полей и удельных обжатию при прокатке мелющих шаров / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, В.В. Курочкин, А.С. Опарин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2019. – Т. 75. - № 7. - С. 834-839; 0,36 п.л. / 0,09 п.л.
5. Rubtsov V.Yu. Modeling rolling of grinding balls in rolls with continuously changing pitch / V.Yu. Rubtsov, V.V. Kurochkin, O.Y., Shevchenko, // Chernye Metally. – 2020. - №6 (1062). – pp.; 36-40 0,38 п.л. / 0,09 п.л. (Scopus)
6. Рубцов В.Ю. Освоение прокатки шаров на стане 60-120 АО «ЕВРАЗ НТМК» / **В.Ю. Рубцов**, А.Н. Бородин, К.А. Улегин, К.Н. Шведов // Сталь. – 2020. - №6. – С. 32-35; 0,18 п.л. / 0,04 п.л.
7. 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; 0,42 п.л. / 0,1 п.л.

8. Rubcov V.Yu Development of new roll pass designs for ball-rolling rolls with continuously variable parameters / **V.Yu. Rubcov**, O.I. Shevchenko // IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering. - Vol 966 - №1. – 2020. – pp. 012070; 0,2 п.л. / 0,1 п.л. (Scopus)
9. Rubcov V.Yu Research into in-service deterioration of ball-rolling rolls / **V.Yu. Rubcov**, O.I. Shevchenko, A.S. Spirina, N.A. Pankova // IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering. Vol 966 - №1. – 2020. – pp. 012069; 0,18 п.л. / 0,04 п.л. (Scopus)

Патент

10. Способ регулирования частоты вращения валков шаропрокатных станков : пат 2723342 РФ / **В.Ю. Рубцов**, А.А. Серебrenников, О.И. Шевченко, Д.А. Замураев ; заявитель и патентообладатель АО ЕВРАЗ НТМК - № 2019117608 ; заявл.06.06.2019 ; опубл. 09.06.2020, Бюл. №16. – 10с; 0,38 п.л. / 0,09 п.л.

Публикации в других изданиях:

11. Рубцов В.Ю. Экспресс-контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Молодёжь и наука : материалы международной науч.-практ. конф.- Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ. – 2017. – Т.1. – С. 20-26; 0,12 п.л. / 0,06 п.л.
12. Рубцов В.Ю. Влияние размеров бочки шаропрокатного валка на качество шара / **В.Ю. Рубцов** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. - Т. 1. - С. 90-93; 0,11 п.л. / 0,11 п.л.
13. Рубцов В.Ю. Возможность использования ассиметричных валков шаропрокатных станков для получения устойчивого режима прокатки / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // В сб.: наука – образование – производство: опыт и перспективы развития. - Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ. – 2018. - С. 106-112; 0,2 п.л. / 0,1 п.л.
14. Рубцов В.Ю. Освоение производства мелющих шаров 5 группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // В сб.: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018. - Т.1. – С. 117-118; 0,04 / 0,02
15. Рубцов В.Ю. Экспресс контроль качества термической обработки при производстве мелющих шаров / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2018. – С.61-62; 0,1 п.л. / 0,03 п.л.
16. Рубцов В.Ю. Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, Н.М. Загребайлов // Молодежь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – Т.1. – С. 18-23; 0,16 п.л. / 0,05 п.л.
17. 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; 0,1 п.л. / 0,05 п.л.
18. Рубцов В.Ю. Калибровка шаропрокатных валков с дифференцированно-изменяющейся глубиной впадины / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Молодёжь и наука : материалы международной науч.-практ. конф.– Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2019. – Т.1. – С. 21-24; 0,08 п.л. / 0,04 п.л.
19. Рубцов В.Ю. Изготовление шаропрокатных валков с переменной глубиной впадины / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2019. - №14. – С. 16-24; 0,3 п.л. / 0,15 п.л.
20. Шевченко О.И. Апробация термической обработки мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, **В.Ю. Рубцов**, В.В. Курочкин // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении ИТММ-2019 : Материалы 4-й науч.-практ. конференции – Пермь. – 2019. – С. 294-297; 0,12 п.л. / 0,03 п.л.

21. Шевченко О.И. Термическая обработка мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, **В.Ю. Рубцов**, В.В. Курочкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2019. – Т.21. - №3. – С. 110-117; 0,36 п.л. / 0,09 п.л.
22. Рубцов В.Ю. Характер интенсивности износа шаропрокатных валков и критерии отбраковки / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Труды XII Конгресса прокатчиков – Москва: Грин Принт. – 2019. Т.1. – С. 187-191; 0,24 п.л. / 0,12 п.л.
23. Рубцов В.Ю. Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных профилей / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2019. – №15. – С. 24-36; 0,88 п.л. / 0,44 п.л.
24. Шевченко О.И. Экспериментальные режимы термической обработки мелющих шаров с получением гарантированной объемной твердости / О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, **В.Ю. Рубцов**, В.В. Курочкин // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 20-22; 0,08 п.л. / 0,02 п.л.
25. Рубцов В.Ю. Критерии отделения перемычки при прокатке шаров / **В.Ю. Рубцов**, В.В. Курочкин, О.И. Шевченко // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, - 2020. - Т.1. – С. 178-179; 0,04 п.л. / 0,01 п.л.
26. Рубцов В.Ю. Опыт применения кривых второго порядка при изготовлении шаропрокатных валков / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, В.В. Курочкин // Калибровочное бюро. – 2020. - №16. – С. 15-20; 0,17 п.л. / 0,05 п.л.
27. Рубцов В.Ю. Анализ и улучшение условий захвата заготовки в шаропрокатных станах / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, А.Н. Бородин // Молодёжь и наука : материалы международной науч.-практ. конф.– Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 130-133; 0,17 п.л. / 0,05 п.л.
28. Рубцов В.Ю. Критерии отделения перемычки при прокатке шаров / **В.Ю. Рубцов**, В.В. Курочкин, О.И. Шевченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2020. – Т.11. - №1. – С. 46-49; 0,12 п.л. / 0,04 п.л.
29. Рубцов В. Ю. Мелющие шары повышенной точности / **В. Ю. Рубцов**, О. И. Шевченко, П. А. Алыпов, В. А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 86–96; 0,39 п.л. / 0,09 п.л.
30. Рубцов В.Ю. Разработка новых калибровок шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимися параметрами / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко // Промышленное производство и металлургия: мат-лы международной науч.-техн. конф. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 247-253; 0,3 п.л. / 0,15 п.л.
31. Шевченко О.И. Исследование разрушения шаропрокатных валков в процессе эксплуатации / **В.Ю. Рубцов**, О.И. Шевченко, А.С. Спирина, Н.А. Панькова // Промышленное производство и металлургия: мат-лы международной науч.-техн. конф. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – С. 310-315. 0,27 п.л. / 0,06 п.л.