

На правах рукописи

Тищенко Дмитрий Александрович

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ, РЕЖИМОВ ПОДГОТОВКИ И  
ЭКСПЛУАТАЦИИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ НШСП  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОКАТА

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2006

Работа выполнена на кафедре прокатки Липецкого государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Мазур Игорь Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Осадчий Валентин Алексеевич  
кандидат технических наук  
Гуров Александр Сергеевич

Ведущая организация: ОАО Московский металлургический  
завод «Серп и молот»

Защита состоится 26 октября 2006 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 217.038.01 при ОАО «Институт Цветметобработка» (119017, Москва, Пыжевский пер., дом 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Институт Цветметобработка».

Автореферат разослан 21 сентября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Э.Н. Калмыкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Конкуренция на мировом рынке требует от производителей ужесточения требований к потребительским свойствам горячекатаной продукции, которые, наряду с механическими свойствами, определяются поперечным профилем, планшетностью и состоянием поверхности готовой полосы. Для их обеспечения используются алгоритмы, заложенные в АСУТП стана горячей прокатки, эффективная работа которых зависит от наличия информации о состоянии полосы, рабочих валков до и после горячей прокатки и других параметрах технологии. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы, связанные с внедрением в АСУТП стана горячей прокатки результатов контроля поверхности проката автоматизированными системами. Это позволит снизить объем несоответствующей продукции по периодическим дефектам горячекатаного проката, число аварийных ситуаций, связанных с обрывом полосы на станах холодной прокатки.

**Цель работы** заключается в повышении качества поверхности и точности профиля горячекатаной полосы, увеличении сроков эксплуатации рабочих валков на основе использования алгоритмов определения и расчета параметров критических дефектов поверхности станов горячей и холодной прокатки.

Для реализации поставленной цели проводились:

- исследование поверхности горячекатаного проката для определения параметров критических дефектов и снижения количества периодически повторяющихся дефектов на стане горячей прокатки, а также уменьшения аварийных ситуаций при последующей холодной прокатке – путем раннего обнаружения дефектов на горячем переделе с помощью разработанных алгоритмов настройки системы контроля качества поверхности (СККП) и сквозному прослеживанию за дефектами горячекатаной полосы на холодном переделе;

- исследование влияния состояния поверхности рабочего инструмента на качество выпускаемой продукции для уменьшения величины съема рабочего слоя при плановых перешлифовках;

- разработка режимов подготовки S-образных рабочих валков в неостывшем состоянии (разница температур середины бочки и края валка составляет от 10°С до 30°С) и исследование влияния неравномерности распределения температурного профиля валка на точность поперечного профиля горячекатаной полосы.

**Научная новизна.** В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- результаты исследования влияния технологических факторов на качество поверхности горячекатаной полосы, разработанные методики и алгоритмы расчета параметров дефектов, настройки, присваивания кода критичности, привязки периодических дефектов к источнику формирования;

- решение задачи упруго-пластического взаимодействия рабочего валка с поверхностной микротрещиной, имитирующей сетку разгара и полосы в процессе горячей прокатки;

- теоретическое обоснование и экспериментальные исследования подготовки S-образных рабочих валков с учетом их начальной температуры.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты использованы на ОАО «НЛМК» для настройки системы контроля качества поверхности на стане 2000 горячей прокатки. На стане 2030 холодной прокатки внедрены алгоритмы присваивания кода критичности и передачи данных, способствующие снижению числа аварийных ситуаций и поломок рабочих валков. Внедрены алгоритмы анализа формирования дефектов поверхности, позволяющие в режиме реального времени оценивать качество поверхности выпускаемой горячекатаной продукции.

Разработаны технические рекомендации для повышения срока эксплуатации рабочих валков первых клетей чистовой группы из высокохромистого чугуна при прокатке тонких полос из углеродистых марок стали.

Для уменьшения технологического цикла подготовки S-образных валков на стане 2000 внедрены режимы шлифования рабочих валков, имеющих среднemasсовую температуру выше температуры в цехе.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе в курсе «Эксплуатация прокатных валков» для студентов специальности «Обработка металлов давлением» Липецкого государственного технического университета.

**Достоверность** полученных результатов основана на использовании классических подходов современной теории прокатки, обоснованности и строгости применяемых математических методов и компьютерных технологий CAD/CAE, экспериментальном подтверждении теоретических результатов в условиях действующего производства.

**Публикации и апробация работы.** Основные материалы диссертации опубликованы в 7 статьях.

Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на научно-технической конференции «Молодежь и наука» (Липецк, 1998 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (Липецк, 2002 г.), международной научно-технической конференции «АКТ-2003» (Воронеж, 2003 г.), международной научно-технической конференция «Теория и практика производства листового проката» (Липецк, 2003 г.), международной научно-технической конференции «АКТ-2004» (Воронеж, 2004 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Непрерывные процессы обработки давлением» (Москва, 2004 г.), международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2005 г.), VI конгресс прокатчиков (Липецк, 2005 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и библиографического списка. Общий объем работы составляет 125 страниц машинописного текста, включая 69 рисунков, 25 таблиц, 4 приложения. Список литературы содержит 100 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность диссертационной работы, цель и задачи исследований, изложены основные положения, вынесенные на защиту.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ выполнен аналитический обзор литературных данных по современному состоянию исследований в области качества поверхности полосы, качества поверхности рабочих валков и точности профиля горячекатаной полосы.

Описаны дефекты поверхности горячекатаной полосы, образовавшиеся в процессе прокатки и дефекты поверхности, обусловленные качеством литого сляба. Проанализированы современные методы обнаружения и изучения дефектов поверхности, которые могли бы нормально функционировать и давать достоверную информацию в условиях производства горячей полосы.

Опыт отечественных и зарубежных металлургических предприятий показывает, что основными причинами выхода рабочих валков из строя являются износ и дефекты поверхности, возникающие в процессе эксплуатации валков. Дефекты поверхности валков передаются на прокатываемую полосу, снижая ее потребительские свойства. Данный аспект недостаточно полно отражен в литературе.

Получение требуемой профилировки для S-образных рабочих валков достигается их шлифованием после охлаждения до температуры окружающей среды (участка подготовки производства). Это увеличивает парк валков, необходимых для непрерывной работы стана горячей прокатки. По этой причине необходима оптимизация технологии подготовки S-образных рабочих валков.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена исследованию формирования поверхностных дефектов на стане горячей прокатки, а также разработке и реализации мероприятий, направленных на повышение качества поверхности на стане горячей прокатки и на снижение аварийных ситуаций на станах холодной прокатки.

Исследования проводились на стане горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК», оснащенного системой контроля качества поверхности горячекатаной полосы, и включали в себя: классификацию типов дефектов, настройку параметров СККП на автоматическое определение дефектов поверхности.

Для настройки автоматической классификации дефектов в режиме реального времени осуществляли отбор изображений дефектов, первоначально обнаруженных системой, анализ изображений и определение (идентификацию) типа дефекта. В случае, если тип дефекта не мог быть определен по изображению, то рулоны, содержащие неизвестные типы дефектов, отбирались и осматривались на агрегатах резки. Для этого проводили пересчет координат полосы из системы контроля качества поверхности в координаты агрегата резки с учетом температуры полосы, а также изменения направления обработки рулона. Места с дефектами осматривали, обнаруженные дефекты фотографировали и определяли их тип. При необходимости проводили дополнительные металлографические исследования, после которых окончательная информация о типе дефекта заносилась в СККП. По мере накопления опыта работы с изображениями дефектов число дополнительных металлографических исследований снижалось. По результатам исследований проведен осмотр более 150 полос, классифицированы 1074 изображения дефектов.

Для повышения способности системы по обнаружению дефектов исследовали влияние внешнего вида поверхности проката на определение дефектов. На основании этих исследований весь сортамент стана 2000 разделили на 5 групп по внешнему виду поверхности (табл. 1).

Таблица 1

## Группы горячекатаного проката

Группы	1	2	3	4	5
Марки стали	Углеродистые (10ЮА, 20); трансформаторные	Углеродистые 08Ю, DC04, Ст3сп	Легированные; Динамные	Углеродистые (S355J2G3, Ст5сп) Легированные (09Г2С, А36)	Рифленая сталь; толщина более 7 мм

Для каждой группы горячего проката найдены параметры определения дефектов, которые использованы в настройке СККП стана 2000 (рис. 1).

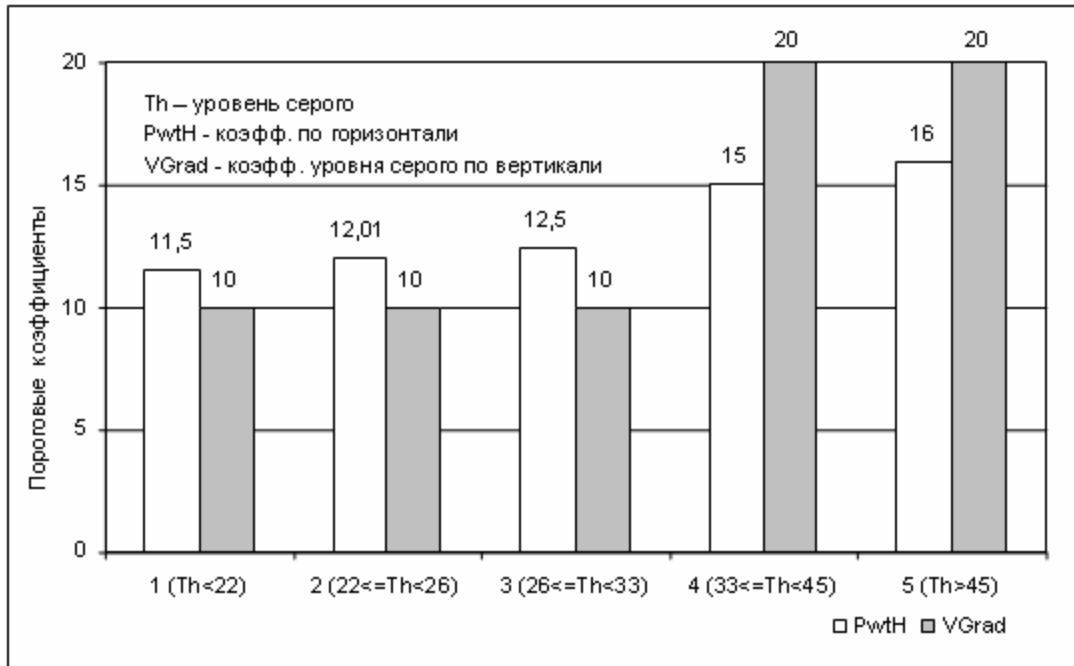


Рис. 1. Параметры определения дефектов поверхности

Мероприятия, направленные на повышение способности системы по обнаружению дефектов и настройке автоматической классификации (определение типа) дефектов поверхности, позволили обеспечить процент определения дефектов на уровне 99,7%, а также средний процент классификации, равный 97,3%, (табл. 2).

Таблица 2

Результаты проведения гарантийных испытаний

Дефект	Число дефектов обнаруженных экспертом при визуальном осмотре	Обнаружено системой и экспертом	Процент определения дефектов	Обнаружено системой и экспертом и правильно классифицировано системой	Процент классификации
Плена слиточная	53	53	100%	50	94,3%
Плена строчечная	53	53	100%	50	94,3%
Недефект	291	290	99,7%	285	98,3%
Складка	3	3	100%	3	100%
Раковина	20	20	100%	19	95,0%
Вкат	20	20	100%	19	95,0%
Трещина поперечная	2	2	100%	2	100%



После проведения гарантийных испытаний работы по классификации неизвестных или малоизученных дефектов поверхности были продолжены. База данных СККП для автоматической классификации дефектов была увеличена более чем на 10000 изображений дефектов (рис. 2).

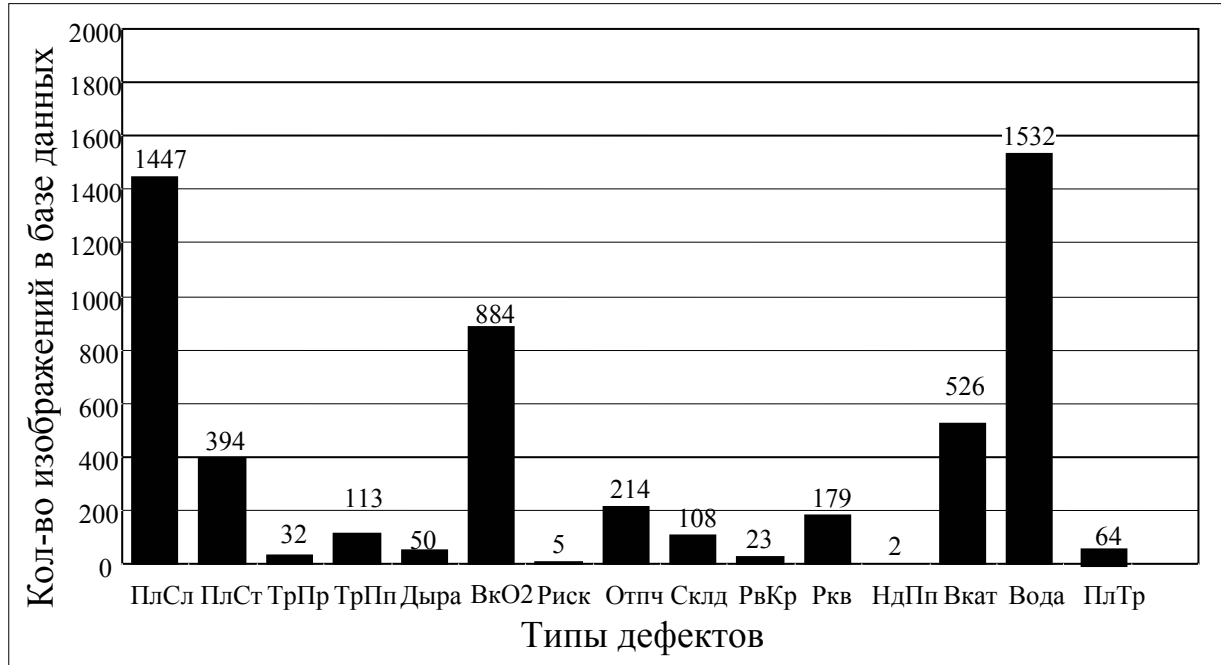


Рис. 2. Распределение общего количества классифицированных изображений дефектов

Для использования результатов автоматического определения дефектов на станах холодной прокатки 2030 и 1400 был произведен анализ обрывности полос. Установлено, что опасными для холодных переделов являются плены строчечные и слиточные, а также раковины и вкаты, когда площадь дефекта превышает  $500 \text{ мм}^2$ , при расположении на кромке, и  $700 \text{ мм}^2$ , если дефект расположен в середине полосы. На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, был разработан алгоритм формирования кода критичности дефекта (от 0 до 7), в основе которого заложены три признака дефектности металла: для марок стали 0401, 0401Д, 0402, 0404Д, 0403 наличие на поверхности подката дефектов типа «плена слиточная», «трещина продольная», «отпечаток», «надрыв поперечный», «плена строчечная», «дыра», «раковина», «трещина поперечная», «вкат»; наличие на поверхности подката дефектов с определенными линейными размерами; наличие на кромках подката дефектов поверхности с определенными линейными размерами. При обработке рулонов на агрегатах подготовки перед станом холодной прокатки на основании кодов критичности и имеющихся на по-

лосе дефектов технологическим персоналом принимается решение о целесообразности дальнейшей обработки данного рулона.

Для стана горячей прокатки критическими являются отпечатки, а также крупные плены с разрывами металла. Для определения источника формирования отпечатков разработана математическая модель по обработке периодических дефектов, использующая информацию из системы контроля качества поверхности и из системы начальной настройки стана. При появлении дефектов одного и того же класса с одинаковыми координатами по ширине полосы рассчитывается разность координат по длине последнего и предыдущего дефекта, сравнивается с ранее полученными значениями, при совпадении выдается периодическая последовательность из дефектов с конкретным значением периода. В модели учитывается также увеличение длины раската из-за вытяжки металла.

Принято, что период отпечатка дефекта на полосе равен: для ролика отводящего рольганга  $T_{рол.отв.} = \pi D_{рол.}$ ; для ролика промежуточного рольганга

$$T_{рол.пром.} = \pi D_{рол.} \frac{h_{под.}}{h_{вых.}}; \quad \text{для ролика межклетевого натяжения}$$

$$T_{рол.мкл.} = \pi D_{рол.} \frac{h_{мкл.пр.}}{h_{вых.}}; \quad \text{для рабочего вала } T_{р.в.} = \pi D_{р.в.} \frac{h_{кл.i}}{h_{вых.}}, \text{ где } D_{рол.} \text{ и } D_{р.в.} -$$

соответственно диаметры ролика и рабочего вала,  $h_{вых.}$  – толщина полосы на выходе из стана,  $h_{под.}$  – толщина подката в чистовую группу клеток,  $h_{мкл.пр.}$  – толщина полосы в соответствующем межклетевом промежутке,  $h_{кл.i}$  – толщина полосы на входе в  $i$ -ю клеть.

Математическая модель реализована в виде программного обеспечения и внедрена на посту управления чистовой группой широкополосного стана горячей прокатки 2000. Созданное приложение используется для информирования оператора стана об источнике формирования периодического дефекта для принятия решения о целесообразности остановки стана, вывалки рабочих валков и устранения причины возникновения периодического дефекта.

Для технологических служб комбината разработан алгоритм для анализа формирования дефектов поверхности на стане горячей прокатки (рис. 3).



Рис. 3. Алгоритм системы анализа формирования дефектов поверхности

В основу работы алгоритма анализа дефектов заложено получение информации из системы слежения за металлом агрегатного уровня, СККП стана 2000, системы начальной настройки стана. Разработанный алгоритм реализован в виде программного обеспечения – информационной системы анализа формирования дефектов, позволяющей исследовать качество поверхности прокатанного металла, а также проводить аналитические оценки состояния поверхности в зависимости от параметров прокатки и технологических факторов.

Результатом проведения работ по улучшению обнаружения дефектов поверхности, настройке автоматической классификации СККП, разработке алгоритмов и внедрению информационных систем по анализу качества поверхности

стало снижение времени простоев стана холодной прокатки по причине обрывов полосы из-за дефектов поверхности. По сравнению с 2003г. снижение простоев стана холодной прокатки 2030 составило в 2004г. – 14,4%, в 2005г. – 31,2%.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены результаты теоретических исследований напряженно-деформированного состояния рабочего вала с микротрещиной. Проведен анализ микропластической деформации полосы в процессе горячей прокатки. Определено влияние поверхности рабочего вала с дефектом в виде трещины разгара на качество поверхности горячекатаной полосы.

Для исследования данного вопроса была разработана упруго-пластическая конечно-элементная модель, описывающая напряженно-деформированное состояние рабочего вала с поверхностным дефектом при циклических тепловых и силовых нагрузках, имеющих место при горячей прокатке. В основу алгоритма заложен вариационный принцип теории пластичности:

$$\iiint_V \sigma^{ij} \xi_{ij} dV + \iint_{\Sigma_P} \tau_v \Delta v_\tau d\Sigma_P - \iint_{\Sigma} p^i v_i d\Sigma = 0,$$

где  $V$  - деформированный объем,  $\sigma^{ij}$  - компоненты тензора напряжений,  $\xi_{ij}$  - компоненты тензора скоростей деформаций;  $\Sigma_P$  - поверхность контакта «полоса - валок»;  $p^i$  - компоненты вектора напряжений;  $v_i$  - компоненты вектора скорости.

В зоне контакта вала и полосы использовался закон трения Амонтона-Кулона:

$$\tau_k = \mu \sigma_n,$$

где  $\tau_k$  - касательное напряжение на контактной поверхности;  $\mu$  - коэффициент трения;  $\sigma_n$  - нормальное напряжение.

Переход из упругого состояния в пластическое определялся из условия Губера-Мизеса:

$$f_S = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} - \tau_S(\Gamma, H) = 0,$$

где  $f_S$  - пластическая составляющая деформации;  $\tau_S$  - предел текучести на сдвиг;  $\Gamma$  - интенсивность деформации сдвига;  $H$  - интенсивность скорости деформации сдвига.

$$S_{ij} = \sigma^{ij} - \sigma_0 \delta_{ij},$$

где  $S_{ij}$  - компоненты девиатора тензора напряжений;  $\sigma^{ij}$  - компоненты тензора напряжений;  $\sigma_0 = \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} / 3$  - среднее нормальное напряжение;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера.

Дополнительно учитывалось тепловое взаимодействие валка с полосой, которое описывали двумерным нестационарным уравнением теплопроводности с граничными условиями третьего рода:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где  $\rho$  - плотность;  $c$  - теплоемкость;  $\tau$  - время,  $\lambda$  - теплопроводность.

Моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке осуществляли для полосы длиной 250 мм. В качестве начальных условий выбраны температурно-скоростные параметры прокатки полосы из стали 08пс типа-размера 2,5x1280 мм в клетки №8 непрерывного широкополосного стана 2000 ОАО «НЛМК». Физико-механические свойства материала рабочего валка и полосы взяты из литературных источников.

Результаты, полученные при математическом моделировании, показывают, что максимальные напряжения по Мизесу наблюдаются у основания микротрещины и составляют 577 МПа, что ниже предела текучести на растяжение (рис. 4).

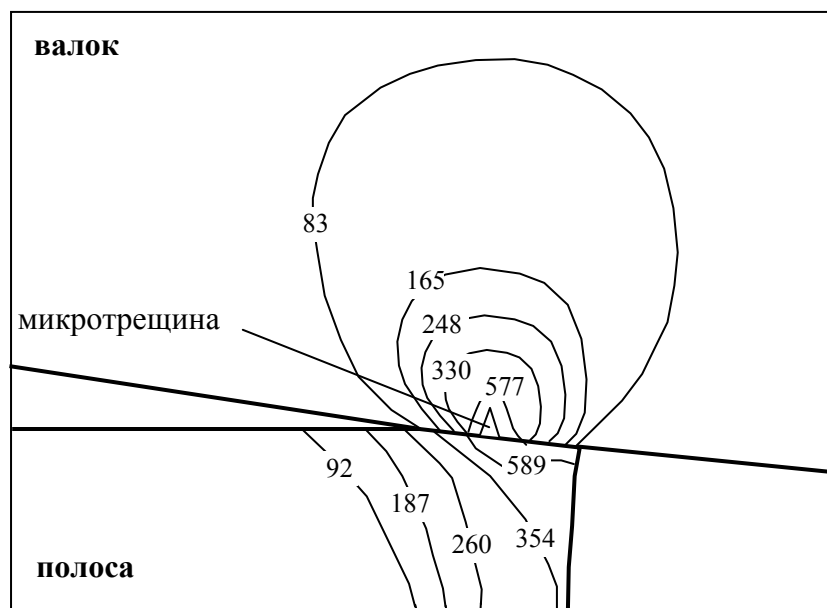


Рис. 4. Распределение напряжений по Мизесу в районе микротрещины, МПа

После контакта полосы с валком, имеющим микротрещину размером  $0,56 \times 0,28$  мм, на поверхности горячекатаного проката формируется отпечаток высотой  $0,05$  мм. Для оценки влияния полученного отпечатка на качество поверхности дополнительно разработана модель напряженно-деформированного состояния при прокатке полосы с дефектом применительно к клетки №9 стана 2000. Получено, что после прокатки ( $h_{\text{вх}}=7$  мм,  $h_{\text{вых}}=5$  мм,  $\omega_{\text{в}}=13$  1/с,  $t_{\text{п}}=900$  °С,  $D_{\text{р}}=820$  мм) от отпечатка остается поверхностный дефект, величина которого не превышает  $0,0032$  мм (рис. 5). В соответствии с ГОСТом 16523-97, EN 10163-91 данное углубление на полосе не является недостатком поверхности, т.к. его величина не превышает  $\frac{1}{2}$  суммы предельных отклонений по толщине полосы.

На основании проведенных исследований рекомендовано снизить съем при плановых перешлифовках для восстановления профиля высокохромистых валков с  $0,85$  мм до  $0,4$  мм, при этом оставшиеся микротрещины с глубиной до  $0,5$  мм не приведут к выкрошке и разрушению валка в процессе горячей прокатки, а производимая горячекатаная полоса будет соответствовать требованиям стандартов по качеству поверхности (без наличия других дефектов).

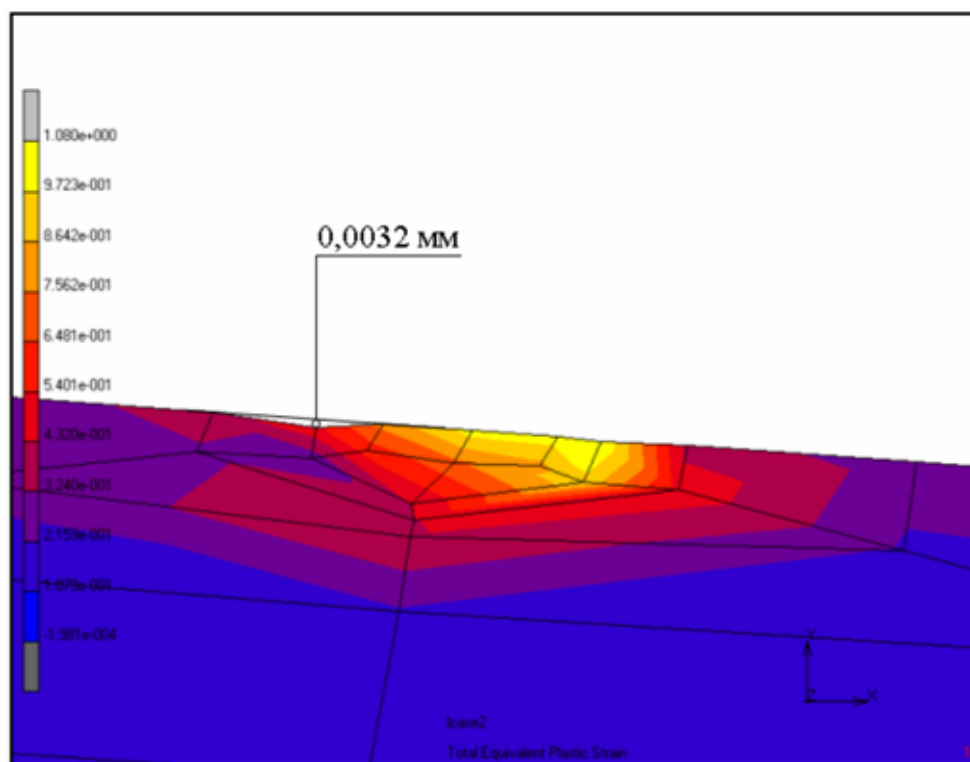


Рис. 5. Конечный вид дефекта «отпечаток».

ЧЕТВЁРТАЯ ГЛАВА посвящена разработке регламента подготовки для шлифования S-образных рабочих валков в неостывшем состоянии.

Для нормальной работы стана от перевалки до перевалки необходимо иметь 6 комплектов валков: в стане, перед станом, на предварительном подогреве, на сборке, на шлифовании, на снятии термоусталостных напряжений. Недостаточное количество комплектов валков, связанное с различными техническими причинами, возможный выход одного из шлифовальных станков из строя и т.д., часто требует проведения шлифовки рабочих валков через несколько часов после перевалки, когда разность температур середин и краев бочки валков составляет 15-25°C, при этом фактическая профилировка рабочего валка в клети может существенно отличаться от прогнозируемой.

Для учета температурного расширения при перешлифовке неостывшего валка проведены экспериментальные исследования температуры поверхности рабочих валков (рис. 6).

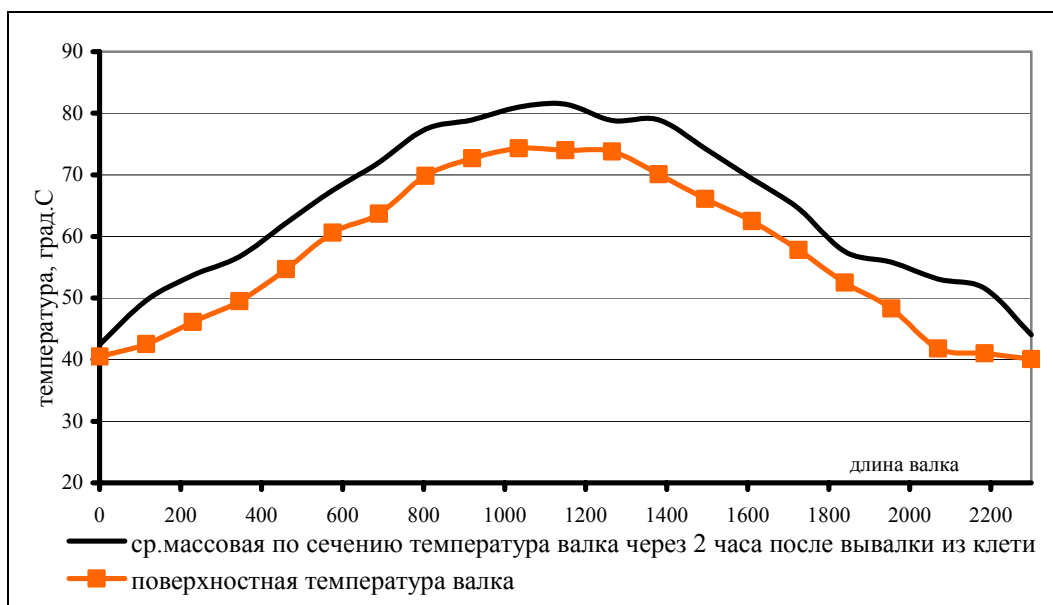


Рис. 6. Температура S-образных валков после вывалки из стана

На основании экспериментальных данных получено распределение по длине валка относительной поверхностной температуры (разности текущей поверхностной температуры и полусуммы температур на краях бочки валка), описываемое с достаточной точностью полиномом до 4-й степени:

$$\Delta t(x) = \Delta t_c \left[ (1-k) \left( 1 - \frac{4}{L^2} x^2 \right) + k \left( 1 - \frac{16}{L^4} x^4 \right) \right],$$

где  $\Delta t_c$  - относительная поверхностная температура середины бочки валка;  $k$  - коэффициент использования полинома 4-й степени. Распределение по длине валка среднemasсовой по сечению температуры, определяющей тепловой контур валка, эквидистантно распределению по длине валка относительной поверхностной температуры. Отсюда контур профилировки валка с учетом его теплового расширения равен:

$$y_t(x) = y(x) + \alpha \frac{D}{2} \Delta t(x) = \\ = a_5 x^5 + \left[ a_4 - k \frac{8\alpha D \Delta t_c}{L^4} \right] x^4 + a_3 x^3 + \left[ a_2 - (1-k) \frac{2\alpha D \Delta t_c}{L^2} \right] x^2 + a_1 x,$$

где  $y(x) = a_5 x^5 + a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x$  - заданный контур валка (полином до 5-й степени),  $k = 0$  для контура валка, выполненному по полиному 3-й степени,  $k = -0,65$  для контура валка, выполненному по полиному 5-й степени (определено экспериментально).

Для учета температурной поправки по разнице середины бочки и края валка необходимо при вводе в компьютер вальцешлифовального станка скорректировать коэффициенты  $a_2$  и  $a_4$  по следующим формулам:

$$\Delta a_2 = \frac{2\alpha D \Delta t_c}{L^2} \quad (\text{для полинома 3-й степени});$$

$$\Delta a_2 = 1,65 \frac{2\alpha D \Delta t_c}{L^2} \quad (\text{для полинома 5-й степени});$$

$$\Delta a_4 = -0,65 \frac{8\alpha D \Delta t_c}{L^4} \quad (\text{для полинома 5-й степени}).$$

Проведено исследование предлагаемого режима подготовки рабочих валков в клетях № 8-10 стана 2000 горячей прокатки ОАО «НЛМК», оборудованных механизмами осевой сдвижки рабочих валков и системой автоматического управления профилем и плоскостностью (PFC) полосы. В соответствии с предлагаемой технологией после вывалки из клетей № 8-10 рабочие валки приготовили для перешлифовки. С помощью контактной термопары провели измерение поверхностной температуры валков в трех точках: в середине и по краям бочки, рассчитали относительную поверхностную температуру середины бочки  $\Delta t_c$  (табл. 3).



Таблица 3

Клеть, положение валка	Поверхностная температура по длине бочки валка, °С			Относительная по- верхностная темпе- ратура середины бочки $\Delta t_c$ , °С
	сторона привода	сторона обслуживания	середина	
8 кл., верх	36	30	52	19
8 кл., низ	30	34	51	19
9 кл., верх	31	29	47	17
9 кл., низ	34	29	41	9,5
10 кл., верх	31	29	49	19
10 кл., низ	33	32	51	18,5

Для заданных по клетям диапазонов регулирования профиля межвалкового зазора, коэффициентов полиномов 3-й степени ( $k = 0$ ) профилировок валков, диаметра валков  $D=800$  мм, длины бочки –  $L=2300$  мм, коэффициента линейного температурного расширения чугунного валка  $\alpha=1,15 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и температур  $\Delta t_c$ , величина коэффициента полинома  $a_2$  с учетом температурной поправки  $\Delta a_2$  для рабочих валков клетей № 8-10 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Клеть, положение валка	Заданный диапазон регулирования профиля межвалкового зазора, мм	Коэффициенты полинома 3-й степени заданного контура валка $y(x)$			Температурная поправка $\Delta a_2 = \frac{2\alpha D \Delta t_c}{L^2}$	Величина коэффициента $a_2$ с учетом температуры валка
		$a_1$	$a_2$	$a_3$		
8 кл., верх	-0,8 / 0	-0,0001445	$1,512 \cdot 10^{-7}$	$3,361 \cdot 10^{-10}$	$6,6087 \cdot 10^{-8}$	$8,5142 \cdot 10^{-8}$
8 кл., низ					$6,6087 \cdot 10^{-8}$	$8,5142 \cdot 10^{-8}$
9 кл., верх	-0,6 / 0	-0,0001045	$1,134 \cdot 10^{-7}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$	$5,913 \cdot 10^{-8}$	$5,4291 \cdot 10^{-8}$
9 кл., низ					$3,3043 \cdot 10^{-8}$	$8,0378 \cdot 10^{-8}$
10 кл., верх	-0,45 / 0,15	-0,0001045	$5,671 \cdot 10^{-8}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$	$6,6087 \cdot 10^{-8}$	$-9,3754 \cdot 10^{-9}$
10 кл., низ					$6,4348 \cdot 10^{-8}$	$-7,6362 \cdot 10^{-9}$

За период двух кампаний были перешлифованы все валки 8, 9 и 10 клетей в горячем состоянии. При применении этих валков при регулировании профиля в системе PFC среднеквадратичное отклонение фактического профиля полосы от заданного профиля составило 10,9 мкм, что на 10-40 % ниже, чем в кампаниях с валками, перешлифованными без учета температуры валков (рис. 7).

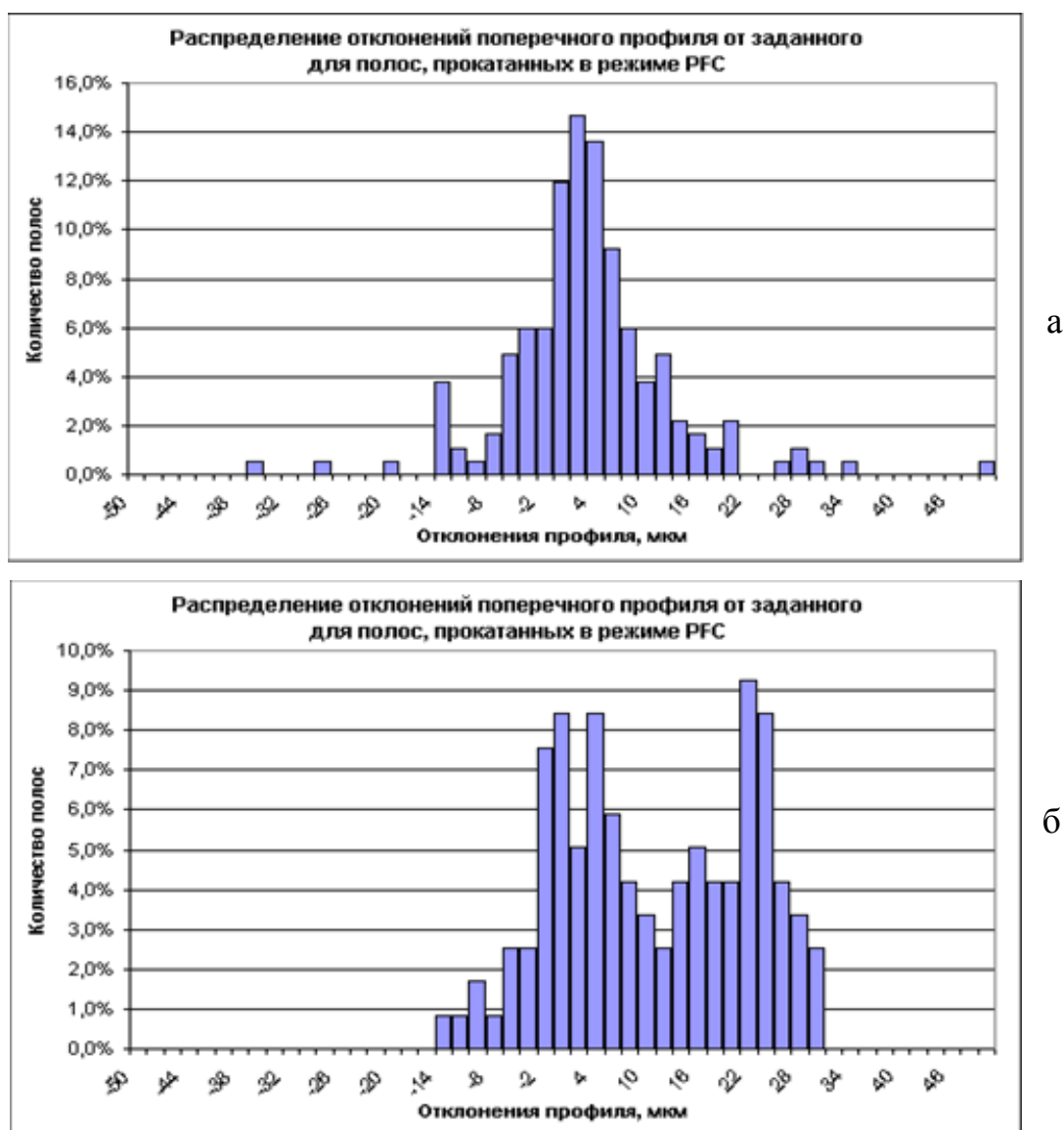


Рис. 7. Показатели точности регулирования профиля полос в кампаниях рабочих валков клетей №8-10, профилировки которых выполнены с учетом перепада температур (а) и без учета (б)

Разработан регламент подготовки рабочих валков прокатного стана, что позволяет снизить необходимый для работы парк S-образных рабочих валков за счет уменьшения технологического цикла их подготовки к эксплуатации, повысить точность регулирования профиля прокатываемой полосы и долговечность валков.

Подана заявка на изобретение МПК В 21 В28/02 «Способ подготовки рабочих валков прокатного стана» №205133964 приоритет от 02.11.2005г.

Внесено изменение №1 в технологическую инструкцию №05757665-ЛПЦЗ-2003 стана 2000 ОАО «НЛМК», касающееся подготовки рабочих валков имеющих температуру поверхности выше температуры в цехе.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для сортамента стана 2000 горячей прокатки разработаны методики настройки, расчета параметров дефектов поверхности горячего проката, включающие в себя разделение всего сортамента проката на группы по внешнему виду поверхности, а также задание в систему пороговых значений определения дефектов для различных групп по внешнему виду. Проведено сравнение изображений дефектов, обнаруженных системой, с действительными результатами визуального осмотра рулонов на агрегатах резки. Полученные результаты использованы для настройки системы контроля качества поверхности.

2. Для определения источника формирования периодических дефектов на стане горячей прокатки разработана и реализована в АСУТП математическая модель, использующая данные о фактических диаметрах рабочих валков и фактическом распределении обжатию, работающая в режиме реального времени с процессом прокатки.

3. На основании проведенных исследований влияния параметров дефектов поверхности на аварийные ситуации на станах холодной прокатки 1400 и 2030 установлено, что превышение значения площади дефекта в  $500 \text{ мм}^2$  (при расположении дефекта на кромке) и  $700 \text{ мм}^2$  (при расположении дефекта по середине полосы) для строчечных и слиточных плен, а также раковин, вкатов на горячем подкате приводит к обрыву полосы при прокатке. Предложено каждому дефекту, обнаруженному и классифицированному системой контроля качества поверхности, присваивать код критичности от 0 до 7 (0 - не критический). Дефекты, имеющие признак «критический», прослеживаются на дальнейшем холодном переделе для сокращения обрывности полос при холодной прокатке.

4. Разработан алгоритм для анализа формирования дефектов поверхности на стане горячей прокатки, реализованный в виде программного обеспечения для СККП стана 2000.

5. Исследованиями напряженно-деформированного состояния по границе микротрещины рабочего валка и отпечатываемости микротрещины на полосу при горячей прокатке установлено, что для микротрещины глубиной 0,5 мм и шириной 0,28 мм максимальная интенсивность напряжений составляет 577 МПа у ос-

нования, что не превышает предел текучести на растяжение для рабочего слоя валка и исключает дальнейшее развитие микротрещины внутрь валка. Теоретические исследования показывают, что сформировавшийся из-за наличия трещины на валке выпуклый отпечаток на полосе высотой 0,05 мм и шириной 0,27 мм при прокатке в последующей клетке становится несущественным. Рекомендовано снизить съём при плановых перешлифовках валков из высокохромистого чугуна с 0,85 мм до 0,4 мм в первых трех клетях чистовой группы стана горячей прокатки 2000.

6. Разработан регламент подготовки S-образных неостывших рабочих валков с учетом неравномерности распределения температурного профиля по длине бочки, позволяющий уменьшить технологический цикл подготовки валков к эксплуатации и тем самым сократить парк валков, а также повысить точность регулирования профиля прокатываемой полосы. Использование нового регламента позволило обеспечить среднеквадратичное отклонение фактического профиля полосы от заданного на уровне 10,9 мкм в рамках одной кампании, что на 10-40 % ниже, чем в кампаниях с валками, перешлифованными без учета неравномерности температуры по длине бочки валков.

**Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

1. Басуров А.В., Тищенко Д.А. Оценка величины съема дефектного слоя рабочего валка чистовой группы НШПСГП при плановой перешлифовке // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением: сб. науч. тр. Ч. 2. – Тула: ТулГУ, 2002. - С.70-75

2. Тищенко Д.А., Басуров А.В., Мазур И.П. Моделирование напряженно-деформированного состояния рабочего валка с дефектом поверхности // Современные технологии и материаловедение: сб. науч. тр. под ред. Ю.А.Баландина. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. - С.250-255

3. Мазур И.П., Тищенко Д.А. Увеличение срока эксплуатации рабочих валков станов горячей прокатки // Наука – производству, 2003. №12. - С.18-19

4. Тищенко Д.А., Долгих П.П. Применение дефектоскопического оборудования и математических методов для повышения эффективности использования поверхностного слоя рабочих валков // Теория и практика производства листового проката: сб. науч. тр. Ч. 2. - Липецк: ЛГТУ, 2003. - С.48-52

5. Мазур И.П., Тищенко Д.А. Настройка классификатора дефектов в системе контроля качества поверхности горячекатаных полос на стане 2000 ОАО

«НЛМК» // Непрерывные процессы обработки давлением: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. (г. Москва, 14-15 апреля 2004 г.). – Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004, - С.109-111

6. Мазур И.П., Тищенко Д.А., Басуров А.В. Контроль качества поверхности горячекатаных полос // Теория и технология процессов пластической деформации – 2004: Тезисы Международной науч.-техн. конф. (г. Москва, 26-27 октября 2004 г.). – Москва: МИСиС, 2004, - С.44-46

7. Третьяков В.А., Барышев В.В., Тищенко Д.А. Установка системы контроля качества поверхности на стане горячей прокатки // Труды VI конгресса прокатчиков. – Липецк: ОАО «НЛМК», 2005, - С.25-29