

На основании теоретических расчетов и лабораторных исследований разработана технология прокатки слитков в дуо реверсивной клетки, позволяющая значительно сократить количество проходов.

Разработанная новая технология прокатки в дуо реверсивной клетки позволит за счет максимального использования резерва сил трения при полностью заполненном очаге деформации между поверхностью рабочего валка и слитком получить за каждую пару пропусков тройное абсолютное обжатие.

Разработанная технология прокатки слитков в дуо реверсивных клетях позволит сократить такт прокатки и повысить производительность прокатного стана.

**Библиографический список:** 1. М.С. Бойченко. Непрерывная разливка стали. Металлургиздат. Москва. 1957г. с. 171. 2. Чекмарев А.П., М.С.Мутьев, Р.А.Машковцев. Калибровка прокатных валков М.Металлургия, 1971г., с. 509. 3. Ю.М.Чижилов. Редуцирование и прокатка металла непрерывной разливки. М.Металлургия 1974г. с.384. 4. В.П.Следнев. Спаренная прокатка сортовых профилей. М. Металлургия. 1978г., с.168. 5. В.К.Кобызев, Электродуговая наплавка фасонных калибров прокатных станов. Труды межвузовской научно-технической конференции. т.2. Ленинград. 1959. 6. Бобров В.В., Полещук В.М., Гладуш В.Д. Оптимизация нестационарных процессов прокатки. Киев. Техника. 1984. с.125. 7. Б.П.Зуев. Интенсификация работы блюминга Кузнецкого металлургического комбината и использование передовых методов труда. Труды НТО ЧМ. т.1. Днепропетровск. 1956. 8. А.П. Чекмарев и др. Прокатка сдвоенных слитков на блюминге 1150. Сталь. 1959. №3. 9. Чумаков В.П., Коренко М.Г. Пути снижения расхода металла при прокатке на блюминге. Металлургическая и горнорудная промышленность №2. 2009г. с.39-42. 10. М.М. Горенштейн. Интенсификация режима обжатий при прокатке по условию трения. Труды межвузовской научно-технической конференции. Ленинград. 1958. 11. А.И. Целиков. Основы теории прокатки. М. Металлургия, 1965. с. 247. 12. А.П. Грудев. Теория прокатки. М. Металлургия. 1988. с. 240. 13. Я.С. Галлай. О коэффициенте трения при прокатке. Труды межвузовской научно-технической конференции. «Современные достижения прокатного производства». т.2.Ленинград. 1959. 14. Патент 52990 МПК (2009) В21В1/00 Спосіб Чумакова прокатки злитків в дуо реверсивній кліті. В.П. Чумаков опубл. 27.09.2010р . Бюлл.№18.

**УДК 628.16:621.981.3**

**ТРИШЕВСКИЙ О.И.**, докт. техн. наук, проф., ХНТУСХ, г.Харьков  
**САЛТАВЕЦ Н.В.**, инженер, ХНТУСХ им. П.Василенко, г.Харьков

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТ ТОЛЩИНЫ ОКАЛИНЫ В СИСТЕМЕ ПОЛОСА-ВАЛОК**

Рассмотрены процессы теплообмена в системе металл-окалина-инструмент при горячей прокатке тонкого листа. Создана лабораторная установка и выполнены экспериментальные исследования зависимости коэффициента теплопередачи от толщины образовавшейся в системе полоса-валок окалины. Предложена методика определения коэффициента теплообмена полосы с валками для упрощения расчётов при математическом моделировании теплообменных процессов при листовой прокатке.

Ключевые слова: полоса, валок, окалина, горячая прокатка, тепловое состояние, коэффициент теплопередачи, методика расчёта.

Розглянуто процеси теплообміну в системі метал-окалина-інструмент при гарячій прокатці тонкої смуги. Створена лабораторна установка і виконані експериментальні дослідження залежності коефіцієнта теплопередачі від товщини окаліни, що утворилася в системі смуга-валок. Запропоновано методику визначення коефіцієнта теплообміну смуги з валками для спрощення розрахунків при математичному моделюванні теплообмінних процесів при листовій прокатці.

Ключові слова: смуга, валок, окалина, гаряча прокатка, тепловий стан, коефіцієнт теплопередачі, методика розрахунку.

The processes of heat transfer in the metal-slag-based tool for hot rolling mill. The installation and performed studies of the coefficient of heat transfer from the thickness of the scale in the strip-roller. The method of determining the coefficient of heat transfer strip with rolls. The technique allows to simplify the calculations in the mathematical modeling of heat-exchange processes of strip rolling. Keywords: strip, roller, scale, hot rolling, heat of states, the coefficient of heat transfer, the method of calculation.

### **Введение.**

Стоящая на протяжении XX столетия задача наращивания объёмов выпуска прокатной продукции потребовала от металлургов неоднократного изменения и усовершенствования применяющихся технологий горячей прокатки листа. В соответствии с этими задачами увеличивались и совершенствовались и системы водоснабжения прокатных станов.

Анализ отечественной и зарубежной технической литературы показал, что на сегодняшний день вследствие отсутствия единого мнения по поводу тепловых процессов, имеющих место на прокатных станах, конструктивное выполнение систем подачи воды для охлаждения валков и полосы отличается значительным разнообразием, недостаточной обоснованностью использования отдельных схем и требует дальнейшего усовершенствования.

В связи с этим одним из существенных аспектов решения проблемы повышения эффективности технологических процессов и оборудования для горячей прокатки листа является необходимость расчётов потребного количества воды для водоснабжения станов ещё на этапе их проектирования или реконструкции. Подобные расчёты могут быть произведены только на основе апробированных математических моделей тепловых процессов, происходящих в системе прокатываемая полоса - валок.

### **Постановка проблемы.**

В работах [1,2] на основе теоретического анализа разработаны математические модели теплового состояния полосы и валков при горячей прокатке листового материала, позволяющие рассчитать тепловое состояние объектов с распределёнными параметрами на всех участках технологического процесса. Одним из важных участков технологического цикла прокатки, который оказывает существенное влияние на тепловое состояние системы полоса-окалина-валок, а, следовательно, и на эффективность и качество готовой продукции, является участок деформации полосы в валках и участок принудительного охлаждения. Для правильного использования уравнений теплового баланса разработанной математической модели при решении задач определения теплового состояния полосы и усилий при горячей прокатке необходимо иметь достоверные значения коэффициента теплопередачи при

различной величине образующейся при прокатке окалины.

Таким образом, **целью настоящих исследований** является создание экспериментальной установки, разработка методики и проведение комплекса экспериментальных исследований по определению значений коэффициентов теплопередачи в зоне деформации от горячей полосы к валкам и их зависимости от толщины образовавшейся в системе полоса – валок окалины.

В связи с поставленной целью установка для проведения экспериментов создавалась с учётом следующих требований: - необходимости обеспечения нагрева образцов до температуры реальной прокатки; – толщина окалины, образовавшейся на поверхности полосы за время эксперимента, должна быть такой же, как и при прокатке; – удельное давление поверхности валка на имитирующей прокатываемую полосу образец, должно соответствовать удельному давлению полосы на валки в реальном процессе горячей прокатки; – вследствие быстротекучести процессов теплообмена, датчик измерения температуры, используемый при экспериментальных исследованиях, должен быть малоинерционным.

При разработке методики проведения экспериментов было установлено, что выбранная толщина экспериментальных образцов – 5 мм позволяет производить их скоростной нагрев в печи до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$ . При этом толщина слоёв окалины и время контакта полосы с валком, составляющее 0,08 сек., соответствуют реальным условиям, имеющим место в технологическом процессе прокатки.

Во время экспериментов полосу нагревали в печи до температур 850, 900, 950 и  $1000^{\circ}\text{C}$ , получая при этом на её поверхности слои окалины различной толщины. С целью сокращения времени проведения экспериментов использовали малогабаритную нагревательную печь. Нагрев полосы контролировали с помощью измерительного комплекса (датчик температуры – термопара, усилитель аналогового сигнала, аналого-цифровой преобразователь, компьютер).

Нагретую полосу размещали в экспериментальной установке на теплоизоляционную асбестовую подкладку и прижимали к ней измерительный блок с термопарой для получения температур при различной толщине окалины в зоне деформации. Удельное давление при этом соответствовало давлению при реальной прокатке.

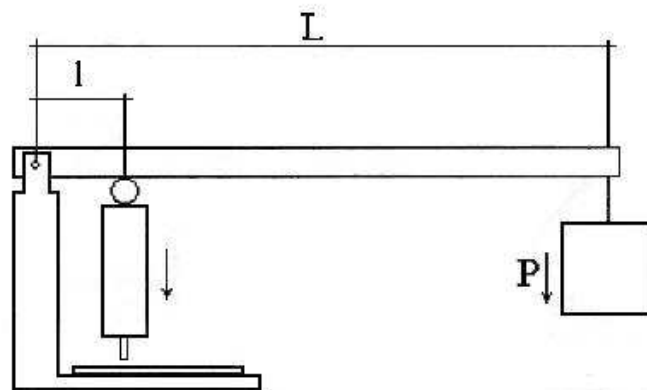


Рис.1 Кинематическая схема нагрузки измерительного блока.  
(L – длина рычага; l – длина плеча; P – груз)

На рис.1 приведена кинематическая схема приложения нагрузки к измерительному блоку.

Площадь контактной поверхности инструмента составляет:

$$S = 1,5 \times 8,25 = 12,375 \text{ мм}^2$$

При  $S = 12,375 \text{ мм}^2$ ,  $l = 65 \text{ мм}$ ,  $L = 960 \text{ мм}$ ,  $P_{уд} = 10 \text{ кг/мм}^2$ . Для получения такого удельного давления вес рычага должен быть:

$$P = P_{уд} \times S \times l / L = 10 \times 12,375 \times 65 / 960 = 8,4 \text{ кг.}$$

Термопара из фольги хромель-копель с толщиной элементов 0,008 мм была припаяна на поверхности измерительного блока. Измерительный блок изготовлен из валкового материала (чугун ЛШР-50). Запись результатов исследований проводили с помощью измерительного комплекса.

На рис.2 приведены графики нагрева поверхности измерительного блока при проведении экспериментальных исследований.

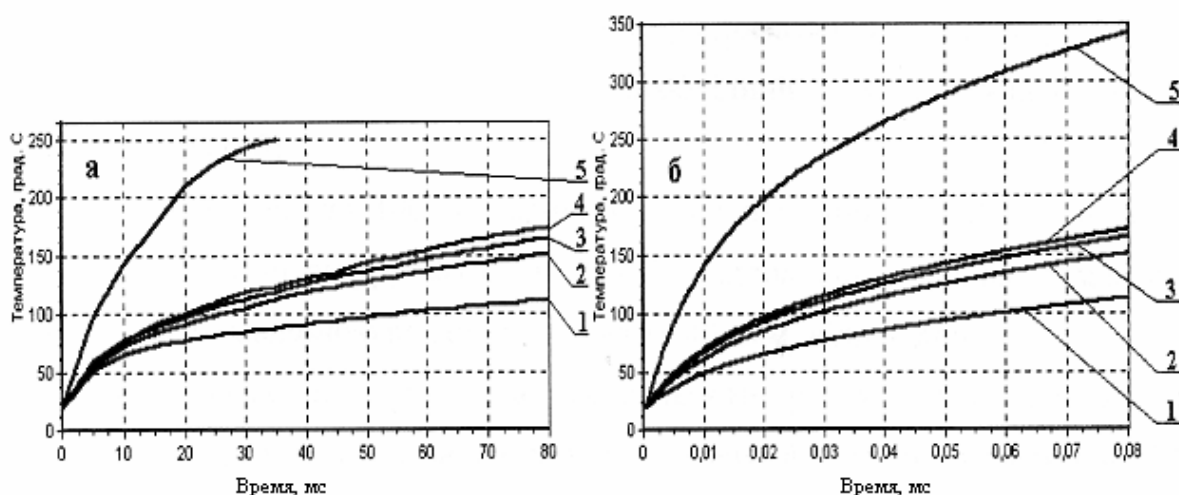


Рис.2. Зависимость температуры поверхности измерительного блока от времени в зоне деформации: а-экспериментальная, б – теоретическая (полученная по методике, изложенной в работе [1])

Кривые 1-5 получены при следующих условиях:

1 –  $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ок}=206 \text{ мкм}$ ;    2 –  $T = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ок}=92 \text{ мкм}$ ;

3 –  $T = 900^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ок}=47 \text{ мкм}$ ;    4 –  $T = 850^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ок}=27 \text{ мкм}$ ;

5 –  $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ок}=40 \text{ мкм}$ .

Здесь  $T$  – температура нагрева полосы в печи;  $h_{ок}$  толщина слоя окалины.

Из графиков видно, что окалина экранирует инструмент от горячей полосы. Через 80 мс самая низкая температура в эксперименте (кривые 1-4) –  $112^{\circ}\text{C}$  получена при контакте инструмента с полосой, нагретой до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$ . Это произошло потому, что при нагреве полосы в печи до  $1000^{\circ}\text{C}$  на её поверхности образуется слой окалины толщиной 206 мкм. Самая высокая температура инструмента (кривая 4) –  $173^{\circ}\text{C}$  зафиксирована для полосы, нагретой в печи до  $850^{\circ}\text{C}$ . Поскольку время нагрева полосы до  $850^{\circ}\text{C}$  меньше, чем при нагреве до  $1000^{\circ}\text{C}$ , то и слой окалины значительно меньше.

В таблице 1 приведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Таблица 1 - Оценка ошибки при выполнении теоретических исследований

№ кривой	Температура, °С		Разница температур
	экспериментальная	теоретическая	
1	112	117,4	5,4
2	151	148	3
3	164	168	4
4	173	167,2	5,8
5	250	256,3	6,3

Кривая 5 получена на установке, в которой нагрев полосы осуществляли в специальной установке с помощью токов высокой частоты (8 КГц, мощность 100 кВт). В этих исследованиях была возможность зачистить поверхность полосы от окалины при достижении температуры 1000 °С и выдержать при постоянном нагреве время, необходимое для образования окалины толщиной 40 мкм [3].

При нагреве полосы до 1000°С и времени контакта 35 мс поверхность инструмента имела температуру 87°С и 250°С соответственно. Разница температур обусловлена различной толщиной слоя образовавшейся окалины (206 мкм и 40 мкм, соответственно)

На практике невозможно предусмотреть все возможные варианты условий, которые могут возникнуть при реальной прокатке, и, соответственно, в лабораторных условиях провести экспериментальные исследования для всех, без исключения, соотношений времени прокатки, температуры полосы и толщины окалины. Необходимо иметь методику теоретического расчёта коэффициента теплообмена полосы с инструментом на основе математического моделирования. На рис. 3 представлены результаты такого теоретического расчета, выполненного в соответствии с методикой решения задач теплообмена в системе полоса, окалина, инструмент, изложенной в работе [1].

Исходные данные для решения этой задачи:

- значения теплофизических характеристик ( $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ) полосы и образующейся на ней окалины приняты для стали Ст.3 сп;
- значения теплофизических характеристик ( $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ) материала вала приняты для чугуна марки ЛШН-50;
- температура полосы и окалины – 1000°С;
- температура вала – 20 °С;
- толщина окалины – 40 мкм принята соответствующей толщине окалины на входе в зону деформации чистой клетки листопркатного стана во втором проходе.

Как видно из рисунка, за время контакта полосы с валами в течение 0,08 с температура полосы на расстоянии 4,25 мм от слоя окалины остаётся неизменной, а температура вала остаётся неизменной в глубину до 3,46 мм. Таким образом, это решение справедливо для толщины полосы при прокатке 8,5 мм и более. Рассчитанная относительно небольшая глубина проникновения тепловой волны в валок – 3,46 мм, даёт возможность утверждать, что для листовых станов горячей прокатки, у которых радиус валков значительно больше глубины проникновения тепловой волны, при определении теплового состояния

путём математического моделирования в многослойной системе полоса – окалина – инструмент, использование прямоугольной системы координат допустимо.

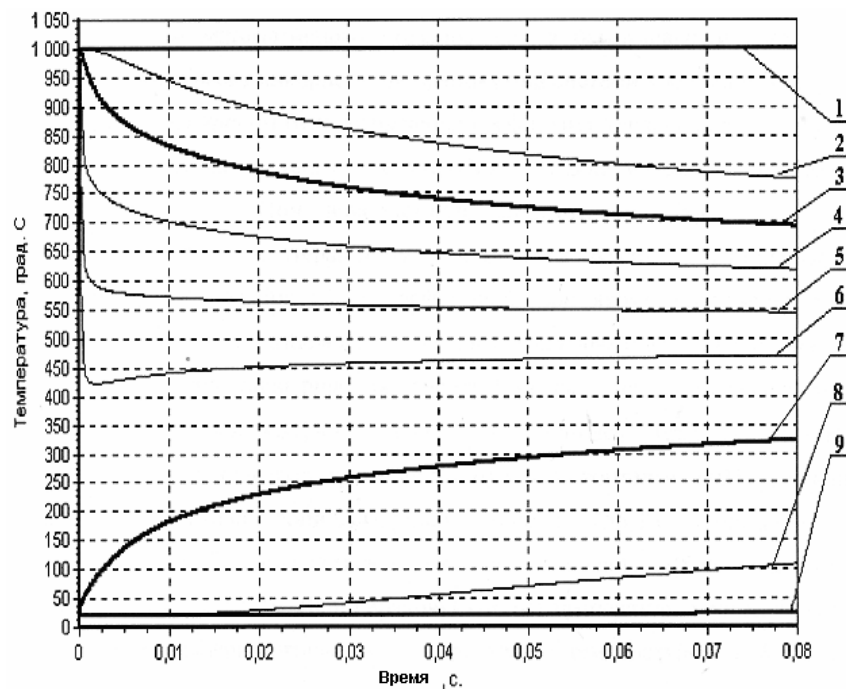


Рис.3. Результаты расчета теплового состояния в системе металл-окалина-валок. (1 – 4,25 мм вглубь полосы; 2 – 0,15 мм вглубь полосы; 3 – поверхность металл – окалина; 4 – 0,008 мм от полосы вглубь окалины; 5 – 0,016 мм от полосы вглубь окалины; 6 – 0,024 от полосы вглубь окалины; 7 – поверхность вала; 8 – 1,2 мм вглубь вала; 9 – 3,46 мм вглубь вала. )

Следующим шагом исследований было определение коэффициента теплообмена в зоне деформации, что является важным этапом разработки методики математического моделирования процесса прокатки. При использовании математической модели для расчета теплового состояния вала итерационным путём подобрано значение коэффициента теплообмена в зоне деформации, при котором теоретическая температура поверхности инструмента совпадает с экспериментальной (время – 0,035 с, температура – 250<sup>0</sup>С). То есть, выполнено решение обратной задачи – по данным экспериментальных исследований определён коэффициент теплообмена в зоне деформации  $\alpha = 10900$  Вт/м<sup>2</sup> х К.

Температура поверхности инструмента за время контакта 0,036 с (возможное время прохождения металлом зоны деформации) достигает 256,3<sup>0</sup>С (теоретическое решение – рис.3, кривая 7) отличается от экспериментального – 250<sup>0</sup>С (рис.2а, кривая 5) на 6,3<sup>0</sup>С или на 2,52%. Если учитывать, что температура полосы была 1000<sup>0</sup>С, то разница между экспериментальной и теоретической температурой в 6,3<sup>0</sup>С составляет 0,63%.

Аналогично определены коэффициенты теплообмена при толщине окалины 206, 92, 47 и 27 мкм и построены кривые 1 – 4 (рис.2б), совпадающие с кривыми 1 – 4 (рис.2а). Коэффициент теплообмена может быть найден и из теоретических решений, если вместо экспериментальных данных использовать результаты

расчёта температуры поверхности инструмента, полученные при определении теплового состояния системы металл-окалина-инструмент (рис.3). Этот путь позволяет избежать необходимости физического моделирования в лабораторных условиях и идти путём математического моделирования процессов теплообмена при горячей обработке металлов давлением, что значительно сокращает время и средства на выполнение исследований.

**Выводы.** Таким образом, разработана методика, создана лабораторная установка и выполнены экспериментальные исследования зависимости коэффициента теплопередачи от толщины образовавшегося при прокатке слоя окалины, результаты которых позволяют утверждать, что новая методика вычисления коэффициента теплообмена полосы с валками может быть использована для упрощения расчетов при математическом моделировании теплообмена в процессах ОМД.

**Список литературы:** 1. Тришевский О.И., Салтавец Н.В. Разработка математической модели теплового состояния полосы при прокатке // Сталь.– 2009 г. №2.– С.42-46. 2. Тришевський О.І., Салтавець М.В., Юрченко О.А. Розробка математичної моделі теплового стану валка при гарячій прокатці листа. – // Восточно-европейский журнал передовых технологий – Харьков: 2009.– Вып. 5/4 (41).– С.14-18. 3. Применение метода электро моделирования для определения теплового состояния валка и раската в очаге деформации при горячей прокатке. Воронцов Н.М., Салтавец В.И. : Сортопрокатное производство / сб. науч. тр. УкрНИИМет .– Харьков: изд. УкрНИИМета, 1974.– С166-169.