

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1107)

03.2024



Тема номера:

90 лет Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова (стр. 15-62)

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 3 (1107), март 2024 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина, Р. М. Валеев, Е. П. Волюнкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада), Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов, С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин, А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства науки и высшего образования РФ включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям: 2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением; 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов; 2.6.3. Литейное производство; 2.6.4. Обработка металлов давлением; 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы; 2.6.17. Материаловедение; 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСИС, оф. 622

Адрес редакции:

• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСИС, оф. 617

• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 3 (1107), март 2024 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФСТ77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 04.04.2024. Формат 60x90/8.

Печ. л. 11. Offsetная печать. Бумага offsetная.

Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

Подписной индекс:

12985 («Пресса России»)

СОДЕРЖАНИЕ

Обогащение руд

- А. Е. Пелевин.* Производство концентрата для внедоменного получения железа из титаномагнетитовой руды. 4

Производство стали

- М. А. Матвеева, И. В. Чуманов, А. В. Ергалов, К. А. Хорошевский.* Исследование усталостных характеристик многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава. 10

90 лет Магнитогорскому государственному техническому университету

им. Г. И. Носова

- Приветствие главного редактора В. М. Колокольцева. 15
- В. А. Бигеев, А. С. Харченко, С. К. Сибатуллин, М. В. Потапова, И. А. Гришин.* Разработка схемы производства ферроникеля и чугуна из руды Сахаринского месторождения по водородной технологии. 16
- А. С. Харченко, С. К. Сибатуллин, Е. О. Харченко, В. А. Бегинюк.* Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности 22
- В. М. Колокольцев, Н. А. Феоктистов, А. С. Савинов, Е. В. Скрипкин.* Исследование процессов формирования структуры и свойств валковых сталей с целью создания их новых составов 28
- Д. Н. Чикишев, Э. М. Голубчик.* Развитие системных подходов в проектировании технологий производства проката из трубных сталей в условиях толстолистовых станов. 33
- А. В. Колдин, Д. В. Терентьев, Р. Р. Дёма, О. Р. Латыпов.* Моделирование тепловых процессов при широкополосной горячей прокатке 40
- А. Б. Сычков, О. Н. Тулупов, А. Н. Завалищин, Н. А. Баранов.* Структурообразование и формирование механических и технологических свойств арматурного проката при поточной термической обработке 47
- Д. В. Константинов, А. Г. Корчунов, А. Ю. Столяров, Ю. Ю. Ефимова.* Исследование структуры и свойств стальной арматуры периодического профиля после знакопеременного изгиба с растяжением. 56

Прокатка и другие процессы ОМД

- А. Р. Фастыковский, А. И. Мусатова, Н. В. Мартюшев, А. И. Карлина.* Обоснование нормативных моделей производительности листопркатного цеха. Сообщение 2 63

Нанесение покрытий и защита от коррозии

- Е. И. Пряхин, В. А. Азаров.* Повышение адгезии фторопластовых покрытий к стальным поверхностям труб с перспективой их использования в газотранспортных системах. 69

Металлургическое оборудование

- С. С. Чибухчян.* Влияние условий эксплуатации на механические свойства деталей двигателя карьерных машин и машин металлургического производства 77

Экономика и финансы

- В. Г. Когденко, Н. А. Казакова.* Анализ рискоустойчивости различных типов компаний черной металлургии в условиях санкций 83

Хроника

- Сергею Михайловичу Горбатьюку — 70 лет 76
- Коллеги о плодотворном сотрудничестве с журналом «Черные металлы» 88
- К 100-летию Вули Аршаковича Григоряна III стр. обл.

Моделирование тепловых процессов при широкополосной горячей прокатке

А. В. Колдин, доцент кафедры физики¹, канд. техн. наук, эл. почта: koldin_av@mail.ru

Д. В. Терентьев, профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением и машиностроения¹, докт. техн. наук, эл. почта: d.terentev@magtu.ru

Р. Р. Дёма, доцент кафедры машин и технологий обработки металлов давлением и машиностроения¹, профессор кафедры металлургических технологий и оборудования², докт. техн. наук, эл. почта: demarr78@mail.ru

О. Р. Латыпов, старший преподаватель кафедры машин и технологий обработки металлов давлением и машиностроения¹, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования², канд. техн. наук, эл. почта: latolegraf@list.ru

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

²Новотроицкий филиал НИТУ МИСИС, Новотроицк, Россия.

В настоящее время в листопрокатном производстве станы горячей прокатки работают при форсированных режимах при одновременном ужесточении требований к качеству проката. В прокатном производстве наблюдают следующие тенденции: увеличение производительности станов в результате сокращения пауз между проходами полос, уменьшение толщины прокатываемой полосы. В связи с этим необходимо решать вопросы определения, контроля и регулирования теплового состояния рабочих валков и полосы. С целью исследования и решения поставленных задач в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г. И. Носова ведут работы по моделированию тепловых процессов при горячей прокатке. Представлены разработанные математические модели теплового состояния полосы при ее прокатке и последующем ламинарном охлаждении на отводящем рольганге, а также теплового состояния рабочих валков в чистовой группе клетей стана. Эти модели реализованы в виде компьютерных программ. Программы расчета теплового состояния полосы позволяют прогнозировать распределение температуры в полосе при горячей прокатке в чистовой группе стана и при ламинарном охлаждении после прокатки, а также выдавать рекомендации по режимам охлаждения (включенным секциям системы ламинарного охлаждения). Программы расчета теплового состояния рабочих валков чистовой группы широкополосных станов позволяют прогнозировать среднюю температуру рабочих валков, а также выдавать рекомендаций по расходу подаваемого охладителя в системе охлаждения валков на прокатную клеть. На основе этих программных продуктов возможны разработка и внедрение новых технологических и технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков и качества полос, производимых на станах горячей прокатки.

Ключевые слова: математическое моделирование, рабочий валок, ламинарное охлаждение, широкополосный стан горячей прокатки.

DOI: 10.17580/chm.2024.03.07

Введение

Одним из основных направлений для современных широкополосных станов горячей прокатки является внедрение на них форсированных режимов работы при одновременном ужесточении требований к качеству проката. Производительность станов увеличивают за счет уменьшения пауз между проходами полос [1, 2]. Уменьшают толщину прокатываемой полосы: в настоящее время толщина полосы может достигать менее 1 мм [3, 4]. Данные тенденции негативно влияют на стойкость прокатного оборудования и качество прокатываемой полосы. В связи с этим необходимо решать вопросы контроля и регулирования теплового состояния формообразующего инструмента (рабочих валков) и заготовки (прокатываемых полос). Несоблюдение теплового режима приводит к локальному перегреву рабочих валков и их преждевременному выходу из строя, потере качества производимой продукции [1–3]. Для предотвращения данной проблемы на производствах внедряют решения, разработанные на основе математических моделей, имитирующих тепловое состояние полос и валков при прокатке [4–6].

В прокатном производстве математические модели используют для разработки и внедрения различных технологических и технических решений.

Обычно при моделировании применяют классические уравнения теплопроводности. Так, в работе [7] разработаны математические модели распределения температуры по толщине полосы и рабочих валков, используемые для определения оптимальной конструкции и настройки сопел системы антишелушения валков. Данная система подхлаждает поверхность полосы перед ее входом в очаг деформации и, как следствие, снижает тепловую нагрузку на рабочие валки. В статье [8] на основе гибридной аналитико-численной модели исследованы термические и механические явления в рабочих валках и получен алгоритм определения деформационной долговечности рабочего валка. Работа [9] посвящена разработке модели определения температурного профиля полосы в процессе ускоренного охлаждения. В данном исследовании модель применена для нахождения оптимальных значений скорости струи и объема подачи охлаждающей воды. На металлургическом заводе Mobarakeh Steel Company (Иран) используют модели [10, 11] для определения рациональной геометрии системы охлаждения на стане горячей прокатки и для исследования распределения температуры и теплопотерь полосы, проходящей через промежуточный рольганг стана [12]. На основании

результатов исследований разработаны рекомендации по выбору типа и использованию термоэкрана. В публикации [13] на основе моделей теплового состояния рабочего валка и деформационной долговечности представлена оценка термоусталостной долговечности рабочего валка. Методом конечных элементов (МКЭ) определены значения растягивающих напряжений в сердцевине, которые постепенно возрастали в процессе прокатки (после прокатки 10 полос равнялись 367 МПа), и число циклов, которое составило 35 145 единиц.

Широко используют при моделировании метод конечных элементов. В работе [14] на основе конечно-элементной модели теплового состояния и модели напряжений течения (уравнения Нортон – Хоффа) исследовали деформацию при захвате полосы валками. В работе [15] представлена компьютерная модель тепловых процессов в прокатных валках, полосе и рулоне, полученная на основе МКЭ. Авторы статьи подтверждают возможность интегрирования в их модель различных методов для определения и прогнозирования фазовых превращений в полосе или для оценки срока службы валков. В работе [16] при помощи конечно-элементной термомеханической модели исследовано влияние силы прокатки на форму полосы (в том числе на плоскостность полосы) при тандемной горячей прокатке. Определено, что на эффективность регулирования усилия в основном влияет боковое течение металла в первой клетки, а в последующей клетки — главным образом сопротивление деформации материала полосы. В работе [17] разработана программа на основе МКЭ для расчета распределения температуры в полосе. Данная программа использована авторами для исследования тепловых процессов в полосе, подогретой с помощью индукционного нагрева. Определено, что полоса быстро нагревается индукционным нагревом как на поверхности, так и в центре из-за теплопроводности и скин-эффекта.

Таким образом, в настоящее время разработка и внедрение математических моделей теплового состояния рабочих валков и полосы являются актуальной задачей.

Цель данной работы заключается в разработке физико-математических моделей как основы для создания технических и технологических решений, направленных на повышение качества продукции и срока службы оборудования или создания инструментов для мониторинга теплового состояния прокатных валков и полосы.

Представлены результаты математического моделирования тепловых процессов при широкополосной горячей прокатке (ШСГП) в виде следующих программных продуктов:

- расчет теплового состояния полосы на ШСГП;
- расчет теплового состояния полосы при ламинарном охлаждении на ШСГП;
- расчет теплового состояния рабочих валков чистой группы ШСГП.

Материалы и методика исследования

Математическое моделирование тепловых процессов при горячей прокатке проводили на основе решения дифференциальных уравнений теплопроводности, а также эмпирических и аналитических зависимостей по определению интенсивности теплоотдачи на поверхности полосы и рабо-

чих валков ШСГП. Программные продукты реализованы в средах разработки Delphi и Lazarus.

Моделирование теплового состояния полосы в чистой группе клетей ШСГП

Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы, согласно работам [18–21], основано на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности. Моделирование температурного поля прокатываемой полосы предусматривает решение двумерной задачи теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

которую можно свести к условно одномерной, пренебрегая распространением тепла за счет теплопроводности вдоль оси x по сравнению с переносом теплоты за счет движения полосы в данном направлении:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

С учетом того, что $v = \partial x / \partial t$, $\alpha = \lambda / c\rho$ уравнение (2) преобразуется к виду (3).

$$v \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·°C); c — удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·°C); ρ — плотность стали, кг/м³; $\alpha = \lambda / c\rho$ — коэффициент температуропроводности, м²/с; v — скорость движения полосы, м/с; T — температура полосы, °C; t — длительность, с.

В уравнении (3) скорость является постоянной при движении полосы между клетями. В процессе деформации полоса движется с ускорением, поэтому каждый шаг Δx_i по координате x будет характеризоваться своей скоростью v_i :

$$v_i = \frac{v_{i-1} b_{i-1}}{b_i} = \frac{v_{i-1} v_{i-1}}{b_{i-1} - 2\Delta y_i}, \quad (4)$$

где b_i — толщина полосы (i -й элемент) после деформации, мм; Δy_i — изменение толщины i -го элемента, мм.

$$b_i = b_{i-1} - 2\Delta y_i; \quad (5)$$

$$\Delta y_i = \sqrt{R^2 - (l_i - \Delta x)^2} - \sqrt{R^2 - l_i^2}, \quad (6)$$

где R — радиус рабочего валка, мм; l_i — длина дуги очага деформации i -го элемента, мм; Δx — длина элементарного участка, мм.

$$l_i = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{1}{2} b_i (1 - \varepsilon) \right)^2}, \quad (7)$$

где ε — величина деформации (отношение размеров до и после деформирования).

Расчетная схема для решения задачи приведена на рис. 1.

Для решения дифференциального уравнения (3) использовали следующие граничные условия, характеризующие интенсивность теплообмена на поверхности полосы:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0,b} = q(y) \text{ или } -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0,b} = \alpha (y) \cdot (T_n - T_c), \quad (8)$$

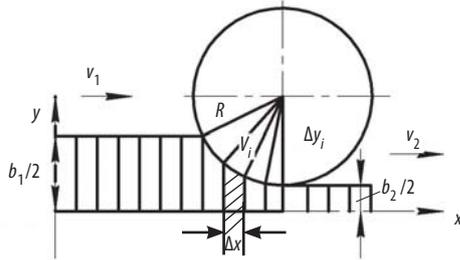


Рис. 1. Схема моделирования теплового состояния прокатываемой полосы: b_1 и b_2 — толщина полосы перед входом в очаг деформации и на выходе из него, мм; v_1 и v_2 — скорость движения полосы до и после очага деформации, м/с

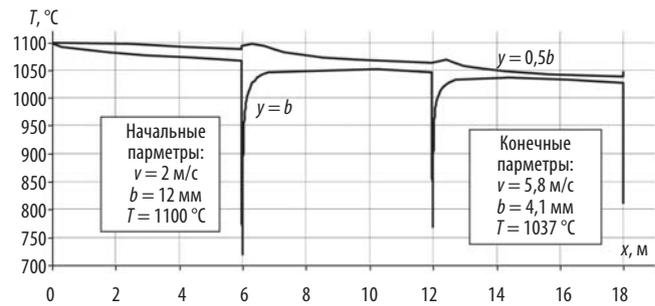


Рис. 2. Распределение температуры полосы (расстояние между клетями 6 м; коэффициент обжатия $\epsilon = 0,3$)

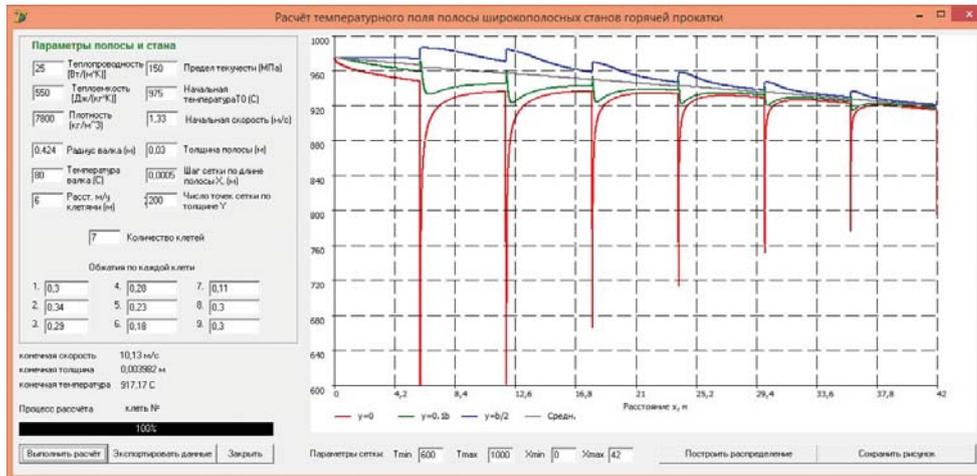


Рис. 3. Окно программы расчета теплового состояния полосы в чистовых клетях ШСГП

где $q(y)$ и $a(y)$ — плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи соответственно; T_n и T_c — температура поверхности полосы и окружающей среды соответственно.

Теплообмен в очаге деформации определяли на основе теории теплообмена при контакте двух полуограниченных тел, согласно которой плотность теплового потока на поверхности тела уменьшается во времени по закону:

$$q = \frac{\lambda(T_n - T_\infty)}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (9)$$

где T_∞ — температура полосы вдали от поверхности теплообмена (использовали значение температуры в середине полосы по ее толщине), °C; τ — продолжительность нахождения в очаге деформации, с.

В результате пластической деформации происходит дополнительный нагрев полосы, который в модели учтен при помощи выражения

$$\Delta T = \frac{\sigma_s \ln \epsilon}{\rho c}, \quad (10)$$

где σ_s — базовое сопротивление деформации, МПа; ϵ — величина деформации (отношение размеров до и после деформирования).

Фактическое значение сопротивления деформации σ_s зависит от состава и структуры металла, температуры, степени и скорости деформации. Сопротивление деформации определяли при помощи известной формулы Андруеюка – Тюленева [21].

Теплообмен в зоне охлаждения воздухом

Для расчета конвективной составляющей теплообмена используют известные критериальные уравнения:

- при ламинарном режиме движения воздуха

$$Nu_x = 0,332 Re_x^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_n} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

- при турбулентном режиме движения воздуха

$$Nu_x = 0,0296 Re_x^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_n} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где критерий перехода $Re_{кр} = \frac{v X_{кр}}{\nu} = 5 \cdot 10^5$. (13)

Интенсивность теплообмена излучением определяли на основе закона Стефана – Больцмана:

$$q = \epsilon_\chi T_n \sigma (T_n + 273)^4 - (T_c + 273)^4. \quad (14)$$

Степень черноты металла ϵ_χ является функцией температуры поверхности [22]. Экспериментальную зависимость степени черноты стали от температуры можно описать выражением

$$\epsilon_\chi(T_c) = \frac{T_n}{1000} \left(0,125 \frac{T_n}{1000} - 0,38 \right) + 1,1. \quad (15)$$

Результаты численного расчета модели теплообмена

На **рис. 2** приведено распределение температуры в полосе с параметрами, характерными при горячей прокатке. Видно, что при контакте полосы с рабочим валками происходит резкое

падение температуры ее поверхности. При прохождении последующих клетей это снижение уменьшается, так как скорость движения полосы в результате обжатия увеличивается и, соответственно, длительность контакта поверхности полосы с валками уменьшается. Несмотря на то, что полоса охлаждается в неподвижном воздухе и отдает часть своего тепла рабочим валкам, температура в более глубоких слоях полосы в момент прохождения клетей повышается. Это вызвано тем, что количество теплоты, выделяемое при деформации металла, больше того, которое полоса отдает за тот же промежуток времени.

Математическая модель была численно реализована в виде программы расчета температурного поля полосы ШСПП (рис. 3), которая позволяет прогнозировать распределение температуры в полосе при горячей прокатке в чистовой группе стана.

Моделирование теплового состояния полосы при ламинарном охлаждении

Для процесса ламинарного охлаждения полосы выделены следующие основные механизмы теплопередачи: конвективное охлаждение в зоне столкновения струи с полосой, теплопередача в зоне пленочного кипения жидкости и теплообмен в зоне конвективного и радиационного охлаждения в воздухе. На рис. 4 представлена схема взаимодействия свободно падающей струи жидкости с горячей поверхностью полосы.

На нижней стороне полосы зона пленочного кипения отсутствует, так как жидкость из нижнего сопла, сталкиваясь с полосой, течет вдоль полосы, а затем из-за потери вертикальной составляющей скорости распадается на капли и падает вниз.

Теплообмен в зоне столкновения определяют при помощи соотношения, полученного на основе модели предложенной Miyasaka [23] и ряда экспериментальных работ других авторов [24, 25]:

$$q_{im} = 8,67 \cdot 10^7 A \cdot \Delta T_{sat}^{-0,385} \left[1 + 0,4 \left(\frac{v_{im}}{100w_c} \right) \right], \quad (16)$$

где $A = q_c(\Delta T_{sub})/q_c(80^\circ\text{C})$ — коэффициент, характеризующий степень переохлаждения воды по отношению к исходному эксперименту с температурой воды 80°C ; q_c — критическая плотность теплового потока при кипении переохлажденной жидкости в свободном объеме, Вт/м^2 ; ΔT_{sub} — переохлаждение воды, $^\circ\text{C}$; $\Delta T_{sat} = T_p - T_s$ (T_p и T_c — температуры поверхности полосы и насыщения воды соответственно, $^\circ\text{C}$); $v_{im} = v_{im}(x)$ — вертикальная составляющая скорости струи в зоне столкновения, м/с .

Для расчета теплоотдачи при пленочном кипении использовали разработанную аналитическую модель пленочного кипения жидкости на движущейся горизонтальной поверхности [24].

Для расчета поля температур в движущейся полосе использовали следующее многомерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial(\rho v_p c T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (17)$$

Уравнение (17) является стационарным в системе отсчета, связанной со струями жидкости. При условии постоянной скорости движения полосы и с учетом того, что $dx = v_p dt$

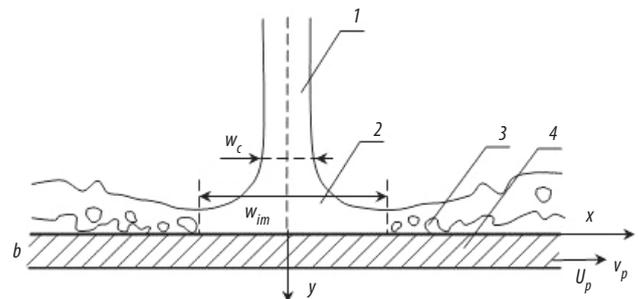


Рис. 4. Схема взаимодействия струи с горизонтальным листом: 1 — струя жидкости; 2 — зона столкновения; 3 — зона пленочного кипения; 4 — полоса; w_{im} — ширина зоны столкновения, мм

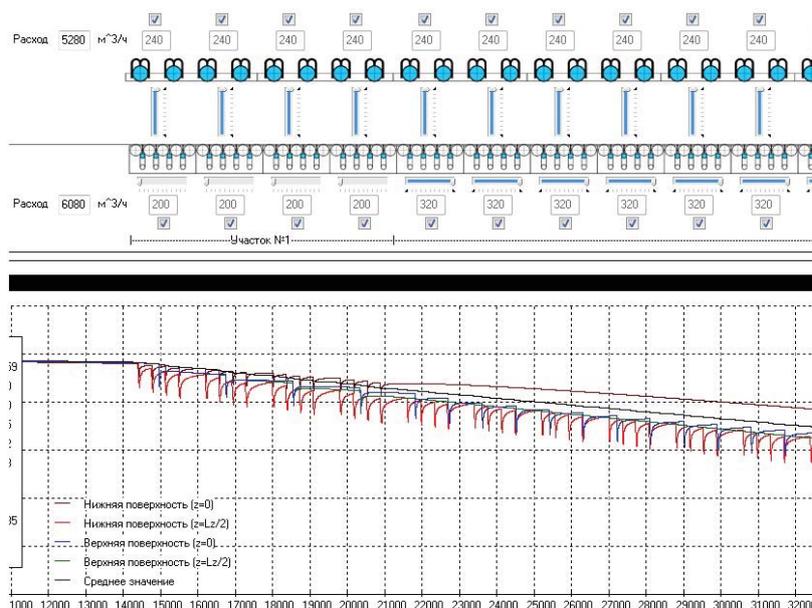


Рис. 5. Окно программы по расчету теплового состояния полосы при ламинарном охлаждении на ШСПП

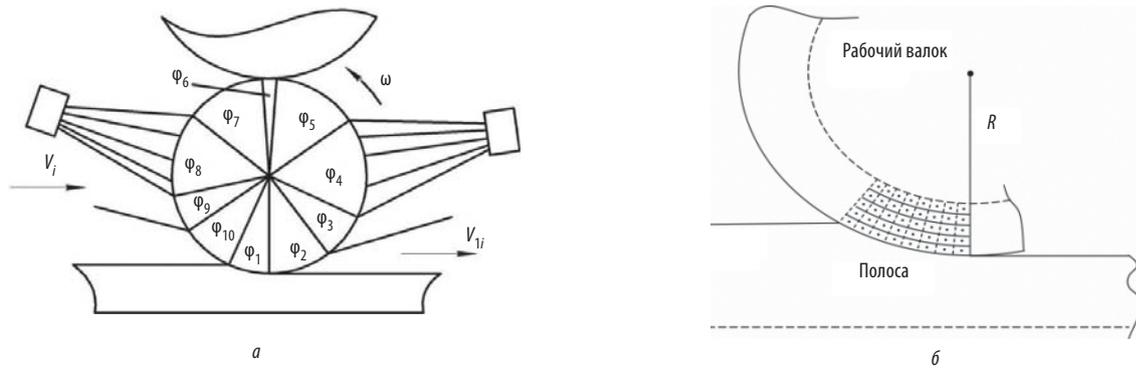


Рис. 6. Моделирование теплового состояния рабочих валков: *a* — сектора теплообмена; *б* — дискретизация валка для построения конечно-разностных уравнений; φ_1 – φ_{10} — зоны охлаждения рабочего валка; V_i и V_{1i} — скорость полосы перед входом в очаг деформации и после соответственно, м/с; ω — угловая скорость вращения валка, рад/с; R — радиус валка, м

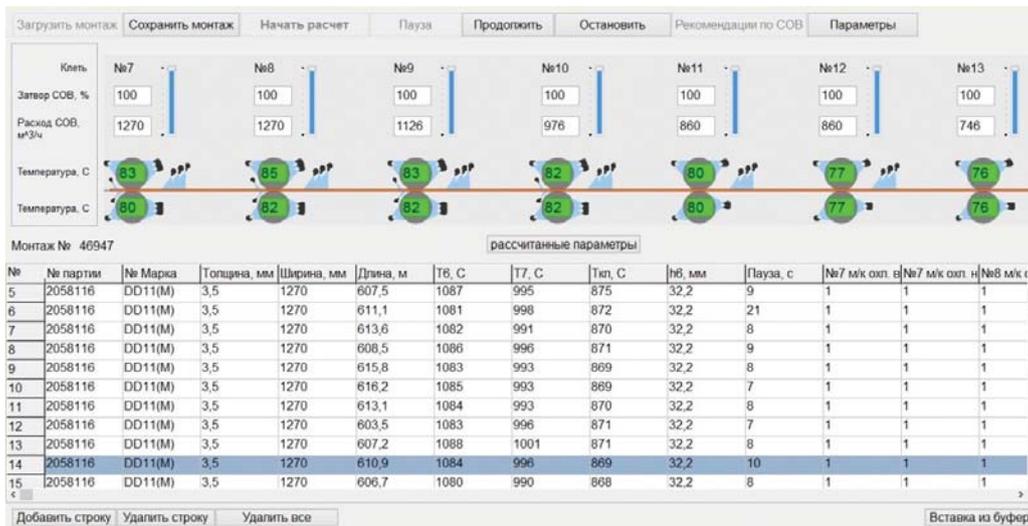


Рис. 7. Окно программы «Расчет теплового состояния рабочих валков чистовой группы ШСГП»

оно является нестационарным уравнением теплопроводности в системе отсчета, связанной с полосой.

В решении уравнения (17) использовали граничные условия 2-го рода:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0, b} = q(x, z), \quad (18)$$

где $q(x, z)$ — локальное значение теплового потока на поверхности полосы, определяемое по уравнениям (11)–(15) и (16), а также уравнениям, описывающим теплообмен при пленочном кипении воды на движущейся поверхности [24] с учетом геометрических параметров системы охлаждения.

Более полная математическая модель теплообмена при струйном охлаждении движущейся полосы представлена в предыдущих работах авторов [26, 27].

На основе представленной математической модели разработана программа расчета теплового состояния полосы, позволяющая прогнозировать распределение температуры в полосе при ламинарном охлаждении, а также выдавать рекомендации по необходимому числу и порядку включенных секций охлаждения (рис. 5).

Математическое моделирование теплового состояния рабочих валков

Схема взаимодействия рабочего валка с системой охлаждения, прокатываемой полосой и окружающей средой показана на рис. 6, а. В угловом секторе φ_1 происходит разогрев поверхности валка от контакта с горячей полосой, в секторах φ_2, φ_{10} — разогрев за счет излучения, исходящего от полосы. В секторах φ_4 и φ_8 валки охлаждаются струями воды, а в секторах φ_3 и φ_9 — стекающей вниз водой, вплоть до отсекаелей. Принято, что в секторах φ_5 и φ_7 происходят потери тепла за счет радиационного охлаждения и конвекции.

В основу математической модели положено уравнение теплопроводности в полярной системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\alpha R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right), \quad (19)$$

где $\alpha = \alpha(R, \varphi)$ — коэффициент температуропроводности, м²/с; R — радиус валка, м; φ — угол точки валка, рад.; T — температура валка, °С; t — время, с.

Граничными условиями для уравнения (16) в секторах водяного охлаждения ($\varphi_4, \varphi_8, \varphi_3, \varphi_9$) выступали эмпирические уравнения, учитывающие расход, давление и температуру поступающей воды. Для нахождения теплового потока в зоне деформации (сектор φ_1) использовали теорию теплообмена при контакте двух полуограниченных тел.

Для решения уравнения теплопроводности весь валок разделили на элементарные объемы по углу и радиусу (см. рис. 6, б), и составили конечно-разностные уравнения, которые решили с использованием метода независимых потоков [28].

Практическим результатом реализации математической модели является разработанное программное обеспечение, главное окно которого показано на рис. 7. Эта программа является инструментом, позволяющим прогнозировать среднюю температуру рабочих валков в чистовой группе клетей ШСГП, а также выдавать рекомендации по назначению расхода подаваемого охладителя в системе охлаждения валков на прокатную клеть.

Пример изменения расчетной средней температуры валков в разных клетях стана во время прокатки 91 полосы приведен на рис. 8. Основным фактором изменения средней температуры валков является изменение временных пауз между прокатанными полосами. Уменьшение средней температуры валка в 13-й клетке при прокатке полос № 1–21 объясняется тем, что данная клеть не была задействована в процессе прокатки, но при этом охлаждалась водой.

Данная математическая модель и программное обеспечение были апробированы в условиях действующего стана горячей прокатки и могут быть применены для других станов с учетом их геометрических и технологических особенностей.

Выводы

Разработаны математические модели и реализовано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать тепловое состояние рабочих валков и полосы на ШСГП при чистовой прокатке и ламинарном охлаждении.

Основное практическое применение полученных программ обусловлено:

- регулированием режимов прокатки в чистовой группе клетей ШСГП;
- выдачей рекомендаций по расходу подаваемого охладителя в системе охлаждения валков на прокатную клеть;
- выдачей рекомендаций по режимам при ламинарном охлаждении.

Таким образом, на основе созданных программ возможна разработка и внедрение новых технологических и технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков и качества полос, производимых на станах горячей прокатки. 

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00808, <https://rscf.ru/project/23-29-00808/>.

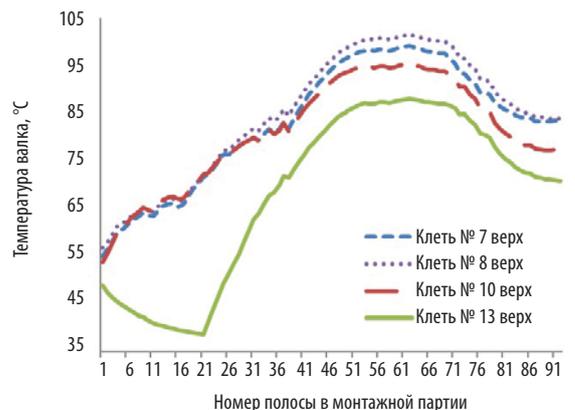


Рис. 8. Изменения средней температуры в середине бочки рабочих валков при прокатке 91 полосы

Библиографический список

1. Sekimoto Y., Fanaka M., Sawada R. et al. Effect of rolling condition on surface temperature of work roll in hot strip mill // Transaction of the ISSJ. 1986. Vol. 16. № 11. P. 240–245.
2. Платов С. И., Дёма П. Р., Лукьянов С. И. Разработка и внедрение технологии охлаждения прокатных валков с целью повышения их эксплуатационных характеристик на широкополосном стане 2000 ОАО «ММК» // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2012. Т. 38 (2). С. 100, 101.
3. Соседкова М. А., Григоренко А. С., Радионова Л. В. Математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18 (4). С. 24–31.
4. Приходько И. Ю., Воробей С. А., Шатохин С. Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопроекатного стана // Сталь. 2005. № 1. С. 72–77.
5. Астахов А. А., Мазур И. П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7 (11-2). С. 83–86.
6. Приходько И. Ю., Чернов П. П., Шатохин С. Е. Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии // Сталь. 2006. № 11. С. 87–93.
7. Oreshina M., Pimenov V., Dabas M. Software for modeling the temperature distribution of strip and work rolls during hot rolling // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2019. 19245846.
8. Corral R. L., Colás R., Pérez A. Modeling the thermal and thermoelastic responses of work rolls used for hot rolling steel strip // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 153-154. P. 886–893. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.090.
9. Biswas S. K., Chen S. J., Satyanarayana A. Optimal temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel // Dynamics and Control. 1997. Vol. 7. P. 327–340. DOI: 10.1023/A:1008268310234.
10. Saboonchi A., Abbaspour M. Changing the geometry of water spray on milling work roll and its effect on work roll temperature // J. Materials Processing Technology. 2004. Vol. 148, Iss. 1. P. 35–49.
11. Abbaspour M., Saboonchi A. Work roll thermal expansion control in hot strip mill // Applied Mathematical Modelling. 2008. Vol. 32, Iss. 12. P. 2652–2669.
12. Mansouri N., Mirhoseini M., Saboonchi A. Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 38. P. 91–104. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.
13. Hu Kejun, Zhu Fuxian, Chen Jufan, Noda Nao-Aki et al. Simulation of thermal stress and fatigue life prediction of high speed steel work roll during hot rolling considering the initial residual stress // Metals. 2019. Vol. 9, Iss. 9. 966. DOI: 10.3390/met9090966.
14. Kumar A., Rath S., Kumar M. Simulation of plate rolling process using finite element method // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 42. Part 2. P. 650–659. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.050.
15. Zhou S. X. An integrated model for hot rolling of steel strips // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 134, Iss. 3. P. 338–351. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)01118-4.
16. Li Lianjie, Xie Haibo, Liu Tianwu, Huo Mingshuai et al. Influence mechanism of rolling force on strip shape during tandem hot rolling using a novel 3D multi-stand coupled thermo-mechanical FE model // Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 81. P. 505–521.
17. Mei R., Li C., Liu X., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method // Journal of Iron and Steel Research,

- International. 2010. Vol. 17, Iss. 2. P. 17–21. DOI: 10.1016/s1006-706x(10)60052-0.
18. Platov S. I., Maslennikov K. B., Urtsev N. V., Dema R. R., Zvyagina E. U. Model of layer-by-layer cooling trajectory in rolled products by TMCP // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037. P. 390–399. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.390.
 19. Мухин Ю. А., Бельский С. М., Макаров Е. В., Стоякин А. О. Математическая модель формирования теплового и фазового состояния стальных полос на отводящем рольганге при тонколистовой горячей прокатке // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении*. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. С. 252–256.
 20. Дёма Р. Р., Платов С. И., Латыпов О. Р., Леванцевич М. А. Математическое моделирование термометрических процессов при горячей прокатке // *Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП 2022)*. 2022. С. 477–481.
 21. Андрюк Л. В., Тюленев Г. Г., Прицкер Б. С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // *Сталь*. 1972. № 6. С. 522–523.
 22. Минкин Д. А., Кораблев В. А., Шарков А. В. Экспериментальное исследование степени черноты поверхности металлических образцов // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2016. № 5. С. 18–23.
 23. Miyasaka Y., Inada S. The effect of pure forced convection on the boiling heat transfer between a two-dimensional subcooled water jet and a heated surface // *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1980. Vol. 13. № 1. P. 22–28.
 24. Ochi T., Nakanishi S., Kaji M., Ishigai S. Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet // *Multi-phase flow and heat transfer III. Part A*. 1984. P. 671–681.
 25. Zumbun D. A., Incropera F. P., Viskanta R. A laminar boundary layer model of heat transfer due to a nonuniform planar jet impinging on a moving plate // *Warme-und Stoffubertragung*. 1992. Vol. 27. P. 311–319.
 26. Koldin A. V., Dema R. R., Nalimova M. V., Mihailov E. et al. Modeling of the thermal state of the hot rolled strip in the accelerated cooling process. Part I: heat transfer model // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. Vol. 54. № 6. P. 1330–1336.
 27. Koldin A. V., Dema R. R., Nalimova M. V., Shapovalov A. N., Mihailov E. Modeling of the thermal state of a hot rolled strip in an accelerated cooling process. Part 2: A calculation of the thermal field of the strip. results and conclusions // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. Vol. 55. № 1. P. 171–181.
 28. Гейн С. В., Зайцев Н. А., Посвянский В. С., Радвогин Ю. Б. Метод независимых потоков для численного решения многомерного уравнения теплопроводности // *Препринт Рос. акад. наук. Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша*. 2023. № 53. С. 1–21.

“Chernye metally”, 2024, No. 3, pp. 40–46
DOI: 10.17580/chm.2024.03.07

Modeling of thermal processes during wide hot strip rolling

Information about authors

A. V. Koldin, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Physics¹, e-mail: koldin_av@mail.ru;
D. V. Terentev, Dr. Eng., Prof., Dept. of Machinery and Technologies of Forming and Engineering¹, e-mail: d.terentev@magtu.ru;
R. R. Dema, Dr. Eng., Associate Prof., Dept. of Machinery and Technologies of Forming and Engineering¹, Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment², e-mail: demar78@mail.ru;
O. R. Latypov, Senior Lecturer, Dept. of Machinery and Technologies of Forming and Engineering¹, Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment², e-mail: lalategraf@list.ru
¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
² Novotroitsk branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

Abstract: Hot rolling mills are experiencing “forced” operating modes while simultaneously tightening the requirements for the quality of rolled products in the sheet rolling industry at the moment. The following trends are observed in rolling production: the productivity of mills is increasing due to the reduction of pauses between strip passes, and the thickness of the rolled strip is decreasing. In this regard, it is necessary to resolve issues of determining, monitoring and regulating the thermal state of work rolls and strips. The Nosov Magnitogorsk State Technical University is conducting work on modeling thermal processes during hot rolling to study and solve the assigned problems. The paper presents the developed mathematical models of the thermal state of the strip during rolling and laminar cooling on the outlet roller table and work rolls in the finishing group of mill stands in the form of computer programs. Programs for calculating the thermal state of the strip make it possible to predict the temperature distribution in the strip during hot rolling in the finishing group of the mill and during laminar cooling after rolling, as well as provide recommendations on cooling modes (included sections of the laminar cooling system). Programs for calculating the thermal state of the work rolls of the finishing group of broadband mills make it possible to predict the average temperature of the work rolls, as well as to issue recommendations on the assignment of the flow rate of the supplied coolant in the roll cooling system to the rolling stand. Based on the developed software products, it is possible to develop and implement new technological and technical solutions aimed at increasing the durability of work rolls and the quality of strips produced in hot rolling mills.

Key words: mathematical modeling, work roll, laminar cooling, wide strip hot rolling mill.

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00808, <https://rscf.ru/project/23-29-00808>.

References

1. Sekimoto Y., Fanaka M., Sawada R. et al. Effect of rolling condition on surface temperature of work roll in hot strip mill. *Transaction of the ISSI*. 1986. Vol. 16. No. 11. pp. 240–245.
2. Platov S. I., Dema R. R., Lukyanov S. I. Development and implementation of cooling technology for rolling rolls in order to improve their performance characteristics on the MMK’s 2000 wide-strip mill. *Vestnik MGU imeni G. I. Nosova*. 2012. Vol. 38 (2). pp. 100, 101.
3. Sosedkova M. A., Grigorenko A. S., Radionova L. V. Mathematical model for calculating metal temperature in a hot sheet rolling mill. *Vestnik MGU imeni G. I. Nosova*. 2020. Vol. 18 (4). pp. 24–31.
4. Prikhodko I. Yu., Vorobey S. A., Shatokhin S. E. Modeling of efficient cooling processes for sheet rolling mill rolls. *Stal*. 2005. No. 1. pp. 72–77.
5. Astakhov A. A., Mazur I. P. Development of a model for studying the thermal state of work rolls of hot rolling mills. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. Vol. 7 (11–2). pp. 83–86.
6. Prikhodko I. Yu., Chernov P. P., Shatokhin S. E. Control of the thermal profile of rolls and flatness of strips by selective emulsion feeding. *Stal*. 2006. No. 11. pp. 87–93.
7. Oreshina M., Pimenov V., Dabas M. Software for modeling the temperature distribution of strip and work rolls during hot rolling. *13th International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2019. 19245846.
8. Corral R. L., Colás R., Pérez A. Modeling the thermal and thermoelastic responses of work rolls used for hot rolling steel strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 153–154. pp. 886–893. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.090.
9. Biswas S. K., Chen S. J., Satyanarayana A. Optimal temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel. *Dynamics and Control*. 1997. Vol. 7. pp. 327–340. DOI: 10.1023/A:1008268310234.
10. Saboonchi A., Abbaspour M. Changing the geometry of water spray on milling work roll and its effect on work roll temperature. *Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 148, Iss. 1. pp. 35–49.
11. Abbaspour M., Saboonchi A. Work roll thermal expansion control in hot strip mill. *Applied Mathematical Modelling*. 2008. Vol. 32, Iss. 12. pp. 2652–2669.
12. Mansouri N., Mirhosseini M., Saboonchi A. Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process. *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 38. pp. 91–104. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.
13. Hu Kejun, Zhu Fuxian, Chen Jufan, Noda Nao-Aki et al. Simulation of thermal stress and fatigue life prediction of high speed steel work roll during hot rolling considering the initial residual stress. *Metals*. 2019. Vol. 9, Iss. 9. 966. DOI: 10.3390/met9090966.
14. Kumar A., Rath S., Kumar M. Simulation of plate rolling process using finite element method. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 42. Part 2. pp. 650–659. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.050.
15. Zhou S. X. An integrated model for hot rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 134, Iss. 3. pp. 338–351. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)01118-4.
16. Li Lianjie, Xie Haibo, Liu Tianwu, Huo Mingshuai et al. Influence mechanism of rolling force on strip shape during tandem hot rolling using a novel 3D multi-stand coupled thermo-mechanical FE model. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 81. pp. 505–521.
17. Mei R., Li C., Liu X., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2010. Vol. 17, Iss. 2. pp. 17–21. DOI: 10.1016/s1006-706x(10)60052-0.
18. Platov S. I., Maslennikov K. B., Urtsev N. V., Dema R. R., Zvyagina E. U. Model of layer-by-layer cooling trajectory in rolled products by TMCP. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037. pp. 390–399. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.390.
19. Mukhin Yu. A., Belsky S. M., Makarov E. V., Stoyakin A. O. Mathematical model of formation of the thermal and phase state of steel strips on the outlet roller table during thin-sheet hot rolling. *Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering*. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2014. pp. 252–256.
20. Dema R. R., Platov S. I., Latypov O. R., Levantsevich M. A. Mathematical modeling of thermal deformation processes during hot rolling. *Physico-chemical foundations of metallurgical processes (FKhOMP 2022)*. 2022. pp. 477–481.
21. Andreyuk L. V., Tyulenev G. G., Pritsker B. S. Analytical dependence of the deformation resistance of steels and alloys on their chemical composition. *Stal*. 1972. No. 6. pp. 522–523.
22. Minkin D. A., Korablev V. A., Sharkov A. V. Experimental study of the emissivity factor of the metal sample surface. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. 2016. No. 5. pp. 18–23.
23. Miyasaka Y., Inada S. The effect of pure forced convection on the boiling heat transfer between a two-dimensional subcooled water jet and a heated surface. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1980. Vol. 13. No. 1. pp. 22–28.
24. Ochi T., Nakanishi S., Kaji M., Ishigai S. Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet. *Multi-phase flow and heat transfer III. Part A*. 1984. pp. 671–681.
25. Zumbun D. A., Incropera F. P., Viskanta R. A laminar boundary layer model of heat transfer due to a nonuniform planar jet impinging on a moving plate. *Warme-und Stoffubertragung*. 1992. Vol. 27. pp. 311–319.
26. Koldin A. V., Dema R. R., Nalimova M. V., Mihailov E. et al. Modeling of the thermal state of the hot rolled strip in the accelerated cooling process. Part I: heat transfer model. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. Vol. 54. No. 6. pp. 1330–1336.
27. Koldin A. V., Dema R. R., Nalimova M. V., Shapovalov A. N., Mihailov E. Modeling of the thermal state of a hot rolled strip in an accelerated cooling process. Part 2: A calculation of the thermal field of the strip. results and conclusions. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. Vol. 55. No. 1. pp. 171–181.
28. Geyn S. V., Zaytsev N. A., Posvyansky V. S., Radvoigin Yu. B. Method of independent flows for numerical solution of the multidimensional heat equation. *Preprint Rossiyskoy akademii nauk. Institut prikladnoy matematiki imeni M. V. Keldysha*. 2023. No. 53. pp. 1–21.