

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1132)

04.2026

Тема номера:

***Развитие металлургии и машиностроения
в Новороссии и Крыму (стр. 4-65)***



Донбасский государственный технический университет
(г. Алчевск)



Донецкий национальный технический университет



Севастопольский государственный университет



Херсонский технический университет (г. Геническ)



Уважаемые читатели журнала «Черные металлы»!

Апрельский выпуск журнала «Черные металлы» имеет для нас, ученых и преподавателей Донбасского государственного технического университета, особое значение. Тематика номера – металлургия Новороссии и Крыма – обращена к южному индустриальному поясу нашей страны, неотъемлемой частью которого является Донбасс.

Металлургия Донбасса и Приазовья ведет свою историю с конца XVIII века. За это время здесь сложились великие заводы и научные школы, определившие развитие отечественной металлургии. В городах этого края десятилетиями формировалась инженерная культура, создавались новые технологии, ковались кадры для всей отрасли.

Наш университет, расположенный в Алчевске, с 1957 г. готовит специалистов для горно-металлургического комплекса региона. История ДонГТУ неразрывно связана с развитием металлургии на этих землях. Заводы Донбасса десятилетиями служили базой практики для наших студентов, а результаты исследований ученых университета внедрялись в производство на крупнейших предприятиях. В советские годы, когда наш университет носил название Коммунарского горно-металлургического института (КГМИ), его сотрудники были активными авторами и читателями ведущих отраслевых изданий, и журнал «Черные металлы» всегда занимал в этом ряду особое место.

Последние годы стали для нас временем возрождения научных связей. Мы рады, что после длительного перерыва ученые Донбасса вновь получили возможность делиться результатами своих исследований с профессиональным сообществом на страницах Вашего журнала. За последние два года количество публикаций сотрудников ДонГТУ в «Черных металлах» заметно выросло, что свидетельствует о возвращении донбасской научной школы в общероссийское научно-образовательное пространство.

Сегодня перед металлургическим комплексом Новороссии стоят масштабные задачи: восстановление производств, их модернизация и интеграция в экономику России. Необходимо сохранить традиции, восстановить компетенции и дать металлургии Новороссии новое дыхание. Решение этих задач невозможно без тесного взаимодействия науки и производства, без подготовки квалифицированных кадров, владеющих современными компетенциями. Уверен, что опыт и знания, накопленные учеными ДонГТУ, будут востребованы в этом процессе.

Благодарю редакцию журнала «Черные металлы» за внимание к нашему региону и надеюсь на дальнейшее плодотворное сотрудничество. Желаю всем авторам творческих успехов, а читателям – интересных и полезных материалов.

**С уважением,
Ректор Донбасского государственного
технического университета**

Д. А. Вишневский

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 4 (1132), апрель 2026 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»
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), И. В. Буторина, С. А. Вологжанина, 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. В. Серебряков, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченёв, 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
Редактор: Ж. Н. Бурындина

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) 245-53-91
Эл. почта: chemet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 4 (1132), апрель 2026 г.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 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: 05.05.2026. Формат 60×90/8.
Печ. л. 11,25. Offsetная печать. Бумага офсетная.
Тираж 400 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 >

Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)

СОДЕРЖАНИЕ

Развитие металлургии и машиностроения в Новороссии и Крыму

- Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, О. А. Левченко, Р. С. Мележик, О. И. Акимова.* Вклад Донбасса в развитие теории и практики совершенствования процессов фракционной подготовки и дробильно-измельчительных машин 4
- Н. А. Денисова, Т. Р. Козлов, Л. Е. Подлипенская, А. Л. Сотников.* Двухканальная интегрированная экспертная система мониторинга нештатной ситуации «Прорыв» на машине непрерывного литья заготовок 12
- С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. И. Прилуцкий, С. В. Мечик.* Совершенствование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ 20
- А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников.* Комбинированная технология контроля и корректировки положения МНЛЗ 29
- Р. Р. Дема, Р. Н. Амиров, Е. Э. Бергер, А. В. Колдин, Е. А. Плотников, Е. В. Шурандин.* Разработка и внедрение новых технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков листовых станов горячей прокатки 37
- С. М. Братан, Н. И. Покинтелица, А. С. Часовитина, Ч. Ф. Якубов.* Диссипативные процессы контактно-фрикционного взаимодействия при термофрикционном резании черных металлов . . . 44
- Е. А. Левченко, Д. В. Моисеев, Д. В. Петров, А. В. Харитонов.* Исследование и моделирование процесса чистового шлифования заготовок из закаленных сталей и твердых сплавов 52
- Г. В. Невар, С. И. Рощупкин, С. М. Братан.* Анализ и моделирование обработки комплексных заготовок из стали на основе теории графов и марковских процессов 60

Обогащение руд

- И. С. Берсенев, Е. С. Берсенев, Э. Р. Сабиров, Н. А. Спирин.* Исследование влияния вязких покрытий на свойства сырых и обожженных окатышей 66

Производство чугуна

- С. В. Мясоедов, В. А. Свинухов, М. А. Бараненко, П. И. Черноусов.* Оценка газодинамических характеристик доменного процесса при использовании мелкофракционного кокса. 72

Металловедение и физика металлов

- У. М. Халикулов, Э. С. Набиев, С. Р. Худояров, М. З. Убайдуллаев, Е. И. Руклинская.* Влияние модификаторов на структуру и свойства стали 35ХМЛ 78

Металловедение и термообработка

- Е. С. Козик, Е. В. Свиденко.* Влияние термической обработки в соляных ваннах на механические свойства чугуна ИЧХ12М 85

Хроника

- Эдуарду Юльевичу Колпишону — 90 летIII стр. обл.

Разработка и внедрение новых технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков листовых станов горячей прокатки

Р. Р. Дема, профессор кафедры машиностроения факультета инженерии и транспорта¹, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением Института металлургии, машиностроения и материалобработки², докт. техн. наук, доцент, эл. почта: demar78@mail.ru

Р. Н. Амиров, профессор кафедры машиностроения факультета инженерии и транспорта¹, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением Института металлургии, машиностроения и материалобработки², канд. техн. наук, доцент, эл. почта: Ruslan2246@mail.ru

Е. Э. Бергер, зав. кафедрой машиностроения факультета инженерии и транспорта¹, эл. почта: berger.61@mail.ru

А. В. Колдин, доцент кафедры физики Института естествознания и стандартизации², канд. техн. наук, эл. почта: koldin_av@mail.ru

Е. А. Плотников, аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением Института металлургии, машиностроения и материалобработки², эл. почта: plotnikov.ea@mmk.ru

Е. В. Шурандин, аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением Института металлургии, машиностроения и материалобработки², эл. почта: shurandin.ev@mmk.ru

¹Херсонский технический университет, Геническ, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

В последнее время совершенствованию систем охлаждения листовых станов уделяют большое внимание. Опыт показывает, что неправильная организация теплового режима охлаждения вала может привести к весьма нежелательным последствиям, вплоть до его поломки. Недостаточное количество охладителя или неправильная его подача вызывают перегрев вала, искажение теплового профиля, образование трещин разгара. Поэтому совершенствование системы охлаждения рабочих валков является актуальной задачей для металлургических предприятий. Для исследования теплового состояния валков стана 2000 горячей прокатки разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать среднеинтегральную температуру поверхности и нестационарное двухмерное температурное поле вала. Результаты расчетов показали, что средняя температура по длине и глубине бочки вала находится на уровне 75–80 °С, при этом градиент перепада температур составляет 140 °С, что отрицательно сказывается на температурных условиях работы вала. Выполнен анализ работы валков в условиях действующего производства стана. По результатам проведенных замеров показано, что температура рабочих валков превышает допустимую на 5–13 °С, а также показано, что существует существенный перепад температур у краев и в центре бочки вала, который составляет 25–38 °С, что приводит к искажению теплового профиля вала и повышению уровня термонапряжений в контактном слое. На основе расчетов предложены технические решения: изменение геометрии установки коллекторов и замена спрейеров на плоскофакельные форсунки. Внедрение усовершенствованной конструкции системы охлаждения на клетях № 4–6 стана 2000 горячей прокатки позволило снизить температуру рабочих валков на 6–10 °С, уменьшить перепад температур по длине бочки от 38 до 18–25 °С, сохранить тепловой профиль и понизить термонапряжения в контактном слое. Испытания подтвердили отсутствие дефектов поверхности валков, что свидетельствует о повышении их эксплуатационной стойкости и эффективности предложенных решений.

Ключевые слова: система охлаждения, коллектор, рабочий валок, тепловое состояние рабочего вала, широкополосный стан горячей прокатки, математическая модель.

DOI: 10.17580/chm.2026.04.05

Введение

Совершенствование технологических процессов, конструкций прокатного оборудования, а также качество готового проката в значительной степени определяются тепловым режимом прокатных станов. Особенное значение имеет тепловой режим для листовых станов, так как кроме отвода теплоты и поддержания стабильных температур валков и полосы он является важным элементом процесса управления профилем и формой полосы, определяющим предельно допустимые скорость и производительность стана [1–6].

При разработке или совершенствовании оборудования листопркатных цехов используют методы математического

моделирования, основанные на численных решениях уравнений теплопроводности как с помощью программ авторской разработки [7–10], так и специализированных программных продуктов, производящих вычисления с использованием метода конечных элементов [11–13].

При помощи конечно-элементного моделирования исследованы процессы образования прикромочной волнистости и поперечной коробоватости полос на отводящем рольганге [11] и в роликосакалочной установке [12]. По результатам моделирования установлено, что неравномерное распределение температуры по поперечному профилю и вследствие этого неравномерное протекание фазовых переходов в итоге

приводит к образованию прикромочной волнистости. Поперечная коробоватость образуется ввиду разной интенсивности охлаждения верхней и нижней поверхностей полосы.

В работе [13] представлен комплексный подход к анализу повреждения рабочих валков при горячей прокатке, учитывающий износ и усталостные явления. Определено, что за 5000 циклов накопленное повреждение при учете износа оказалось существенно ниже, чем без его учета, что подтверждает необходимость совместного анализа износа и усталости при прогнозировании ресурса прокатных валков.

Для определения влияния тепловых и деформационных и других факторов на состояние прокатных валков и заготовок широко применяют искусственные нейронные сети [14–19].

В работе [14] разработана методика, сочетающая в себе классические физические модели и машинное обучение, в которой усилие прокатки прогнозируется не напрямую. Сначала происходит вычисление обратным способом по формулам Симса – Мисаки репрезентативной температуры, по которой определяют усилия прокатки с помощью искусственных нейронных сетей.

В работах [15–18] представлен комплекс примеров цифровизации металлургического производства с использованием методов машинного обучения, компьютерного зрения и математического моделирования. Для прогнозирования механических свойств проката литейно-прокатного комплекса разработаны модели, показавшие высокую точность: средняя ошибка RMSE для предела текучести составила 15,7 МПа, а 95,5 % предсказаний относительного удлинения лежат в пределах $\pm 3,6\%$ (абс.). Для стана 5000 с использованием архитектуры YOLOv5 создана система обнаружения локальных перегретых зон на поверхности плит после ускоренного охлаждения по изображениям тепловизора. Решена задача целочисленной линейной оптимизации раскроя трубной заготовки. Для автоматизации контроля гидроиспытаний труб предложен метод кластеризации фоновых изображений на основе адаптивной модели смешения фонов и морфологических фильтров, обеспечивающий обнаружение утечек по появлению пара.

В исследовании [19] получена нейросетевая модель, позволяющая прогнозировать профиль износа прокатных валков стана 1950 горячей прокатки с учетом технологических параметров прокатки, что повысило точность по сравнению с классическими методами расчета.

Для обеспечения заданных параметров теплового режима современные станы оснащают мощными системами охлаждения и теплового профилирования валков и полосы [20–25].

В последние десятилетия совершенствованию систем охлаждения листовых станов уделяют большое внимание [20–27]. Опыт показывает, что неправильная организация теплового режима прокатки может привести к весьма нежелательным последствиям, вплоть до поломки валка. Так, на стане 2000 недостаточное количество жидкости (или неправильная ее подача) вызывает перегрев валка, искажение теплового профиля, образование трещин разгара (этот процесс связан с термоциклированием, т. е. с циклом «нагрев – охлаждение»). В частности, черновые клетки

на стане 2000 горячей прокатки подвергаются значительному термическому изнашиванию.

Целью данной работы является повышение стойкости рабочих валков черновой группы клеток стана 2000 горячей прокатки путем совершенствования их системы охлаждения.

Для достижения цели решены следующие задачи.

1. Разработана математическая модель для расчета среднеинтегральной температуры поверхности валка в радиальной плоскости и определения нестационарного двухмерного температурного поля валка.

2. Выполнен анализ работы и теплового состояния рабочих валков черновой группы клеток стана с помощью модели теплового состояния и замеров в условиях действующего производства.

3. Разработаны рекомендации по усовершенствованию конструкции системы охлаждения валков стана на черновых клетях № 4–6 и выполнено их испытание.

4. Проведена оценка эффективности применения усовершенствованной системы охлаждения прокатных валков.

Моделирование теплового состояния рабочих валков черновой группы стана 2000 горячей прокатки

Определение среднеинтегральной температуры поверхности валка

В качестве основного параметра, определяющего работоспособность рабочих валков, использовано среднеинтегральное значение температуры поверхности валка, определяемое при помощи уравнения теплового баланса, которое при граничных условиях 1-го рода рассчитывают по формуле

$$dQ(\varphi, T_0) = \lambda \left. \frac{\partial t(r, \varphi, T_0)}{\partial r} \right|_{r=R_0} dT(\varphi), \quad (1)$$

где $Q(\varphi, T_0)$ – тепловой поток, зависящий от угла φ и времени T_0 ; $dT(\varphi) = bR_0 d\varphi$ – дифференциал площади поверхности валка, участвующий в теплообмене; b – ширина прокатываемого металла; λ – коэффициент теплопроводности материала валка.

Для перевода безразмерного температурного поля в размерное использовано выражение

$$\Theta(r, \varphi, T_0) = \frac{t(r, \varphi, T_0) - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}},$$

откуда

$$t(r, \varphi, T_0) = [\Theta(r, \varphi, T_0)(t_{\max} - t_{\min}) + t_{\min}], \quad (3)$$

где T_{\max} , T_{\min} – максимальная и минимальная температура на поверхности валка соответственно.

При нестационарном процессе, очевидно, что за один оборот количество подведенного тепла к поверхности валка равно отведенному. Поэтому через φ_n обозначен угол подвода, а через φ_m угол отвода тепла, при этом $\varphi_n + \varphi_m = 2\pi$.

При проектировании оборудования необходимо задать оптимальные граничные условия $t(\varphi)$, т. е. определить, на какие углы нужно установить проводки и где должны быть размещены коллекторы.

Тепловой поток, подведенный к валку на участке φ_n , равен потоку, отданному охлаждающей среде на участке φ_m , что можно выразить в безразмерной форме в виде

$$\Theta = \frac{\Theta(\varphi_n)\varphi_n + \Theta(\varphi_m)\varphi_m}{\varphi_n + \varphi_m} \quad (4)$$

Определение нестационарного двумерного температурного поля валка

В работах [8, 21, 24] показано, что с достаточной для инженерных расчетов точностью тепловое состояние валка может быть описано уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат, которое в упрощенном виде представлено следующим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

где $T(r, \varphi, z, \tau)$ – температура; τ – время; r, φ, z – цилиндрические координаты; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности.

Характерную продолжительность распространения тепла по угловой координате φ можно оценить как $\tau = R^2/a$. Данное уравнение решали для областей $z = 0-L/2; r = 0-R$.

Анализ работы и теплового состояния валков черновой группы клетей стана 2000 горячей прокатки

Анализ работы валков с помощью модели теплового состояния валков

При численной реализации математической модели получены зависимости при существующем режиме прокатки. Разработанная модель рассматривает валок как двумерную задачу, считая, что исследуемый объект (прокатный валок)

является симметричным цилиндрическим телом. С помощью модели выполнен анализ работы и теплового состояния рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 горячей прокатки. В качестве исходных данных для расчета по модели использовались параметры, представленные в **табл. 1**.

Построены зависимости, описывающие изменение температуры по глубине и по длине валка (**рис. 1, 2**).

Средняя температура по длине и глубине бочки валка, график распределения которой приведен на рис. 2, находится



Рис. 1. Изменение температуры по глубине валка



Рис. 2. Средняя интегральная температура по длине и глубине бочки валка

Таблица 1

Исходные данные для расчета температуры рабочих валков

Параметр	Номер клетки		
	4	5	6
Скорость движения полосы (окружная скорость валка), м/с	1,5		3
Температура полосы T_n , °C	1150	1100	1000
Ширина прокатываемого листа B , мм	1100		
Входная толщина прокатываемого металла h_0 , мм	120	80	50
Выходная толщина прокатываемого металла h_1 , мм	80	50	20
Угол охлаждения, град.	60÷75	60÷75	60÷75
Угол охлаждения воздухом, град.	160	160	170
Температура валка в начальный момент времени T_0 , °C	30		
Температура охлаждающей воды, °C	35		
Температура охлаждающего воздуха, °C	20		
Коэффициент теплоотдачи от горячего металла к валку, Вт/(м ² °C)	15000		
Масса одного сляба, т	20		
Средняя длительность паузы, с	20		
Эквивалентный диаметр отверстия форсунки, мм	10,6		
Площадь поперечного сечения форсунок, мм ²	88		

в пределах 75–80 °С. Градиент перепада температур составляет 140 °С, что оказывает отрицательное влияние на температурные условия работы валка. Таким образом, с целью улучшения эксплуатационных характеристик валка необходимо изменить градиент температуры, понизив на 10–15 °С среднюю температуру по длине и бочке валка.

Анализ работы валков в условиях действующего производства

Проведены замеры температуры верхнего рабочего и опорного валка клетки № 6. Измерения производили при помощи переносного бесконтактного лазерного пирометра Time Ti 213EL обладающего следующими характеристиками: диапазон измеряемых температур от –25 °С до +1200 °С; точность – ±1 %; разрешение – 1 град.; повторяемость – +0,5 % или +0,5 °С; спектральная характеристика – 8–14 мкм; длительность ответа – менее 200 мс.

Замер температуры валков выполняли в клетке после их остановки и отключения охладителя перед перевалкой. Для сравнительной оценки изменения температуры в различных монтажах фиксировали прокатываемый тоннаж и номер монтажа. Результаты измерений представлены в **табл. 2**.

По результатам проведенных замеров видно, что температура верхних рабочих валков превышает допустимую на 5–13 °С. Для валков № 76 и 75 замеренная температура находится в норме, так как ее измерение происходило непосредственно после вывалки валков из клетки.

По данным табл. 2 видно, что существует существенный перепад температур у краев и в центре бочки валка, который составляет 25–38 °С, что приводит к искажению теплового профиля валка и повышению уровня термонапряжений в контактном слое. Температура верхнего опорного валка находится в норме и составляет 40–46 °С, существенного перепада температуры по длине бочки опорного валка не зафиксировано.

Разработка и внедрение рекомендаций по усовершенствованию конструкции системы охлаждения валков на черновых клетях № 4–6

Предложения по настройке и повышению эффективности работы системы охлаждения

Согласно проведенным исследованиям для клетки № 6 стана 2000 горячей прокатки, количество охладителя, подаваемого на поверхность рабочего валка, недостаточно для обеспечения требуемого теплосъема. В существующей схеме подачи охладителя на верхний опорный валок охладитель подают в большем количестве, чем требуется.

Предложены следующие решения.

1. Перераспределить объемы охладителя с опорного валка на рабочий.
2. Изменить геометрическое местоположение коллектора, опустив его ниже на 200 мм к оси прокатки с сохранением угла наклона к вертикальной оси прокатки 53 град.

Усовершенствованная конструкция коллектора охлаждения валков

С целью снижения температуры рабочего валка и уменьшения перепада температуры по длине бочки валка предложено реконструировать нижний коллектор спрейерного типа, в котором вместо отверстий установить плоскофакельные форсунки. Изготовили и установили коллекторы усовершенствованной конструкции с 48 форсунками типа 664.964 (компания «Спрейн-Системс»). Схема коллектора представлена на **рис. 3**.

Оценка эффективности применения усовершенствованной системы охлаждения валков на клетях № 4–6 стана 2000 горячей прокатки

Для оценки эффективности усовершенствованной системы охлаждения проведено измерение температуры бочки рабочих валков (**табл. 3**).

Таблица 2

Результаты измерений температуры рабочих валков черновой группы стана 2000 горячей прокатки, °С

Тип валка	Номер валка	Положение валка	Длина бочки валка, мм					Суммарная масса монтажей, т
			0	500	1000	1500	2000	
Рабочий	70	Верхний	45	54	83	52	43	23100
	69	Нижний	50	78	90	70	43	
Опорный	–	Верхний	44	46	46	41	39	–
	–	Нижний	–	–	–	–	–	–
Рабочий	56	Верхний	43	52	75	56	42	18460
	81	Нижний	47	58	81	56	45	
Опорный	–	Верхний	40	41	42	42	40	–
	–	Нижний	–	–	–	–	–	–
Рабочий	76	Верхний	41	48	65	50	40	21470
	75	Нижний	42	58	67	54	42	
Опорный	–	Верхний	39	41	40	41	39	–
	–	Нижний	–	–	–	–	–	–

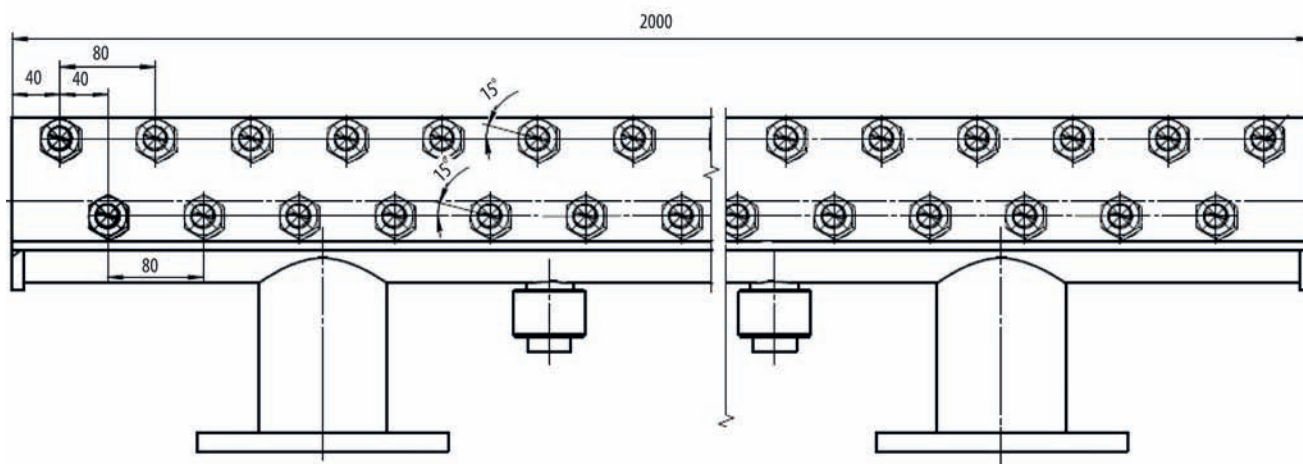


Рис. 3. Схема коллектора охлаждения рабочих валков черновой группы стана 2000

По результатам проведенных исследований видно, что температура верхнего рабочего валка изменилась и составила 69–74 °С при прокатке монтажей суммарной массой от 8000 до 10500 т. При прокатке монтажей массой от 11000 до 23000 т зафиксировано уменьшение температуры на 4–6 °С, температура валков составила 70–74 °С.

Зафиксировано снижение перепада температур на краях и в центре бочки валка, который составил 18–25 °С, что приводит к сохранению теплового профиля валка и уменьшению уровня термонапряжений в контактном слое.

Температура верхнего опорного валка после установки усовершенствованной конструкции охладителя не изменилась и находится в норме, составляя 41–44 °С (зафиксировано

незначительное снижение на 2–4 °С). Существенного перепада температуры по длине бочки опорного валка не зафиксировано.

Испытания усовершенствованной системы охлаждения не выявили наличия внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических трещин, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке). Получение несоответствующей продукции по дефекту «вкатанная окалина» не зафиксировано.

Контроль величины «съема» и «износа поверхностей» рабочих валков является некорректным, так как до и после монтажа усовершенствованной системы охлаждения использовали рабочие валки разных производителей.

Таблица 3

Результаты измерения температуры после реконструкции системы охлаждения, °С

Тип валка	Номер валка	Положение валка	Длина бочки валка, мм					Суммарная масса монтажей, т
			0	500	1000	1500	2000	
Рабочий	167	Верхний	41	53	69	52	41	10350
	166	Нижний	46	78	80	71	45	
Опорный	–	Верхний	41	42	44	40	41	
	–	Нижний	–	–	–	–	–	
Рабочий	171	Верхний	40	50	69	55	40	9100
	170	Нижний	41	46	69	53	41	
Опорный	–	Верхний	39	40	36	36	37	
	–	Нижний	41	36	32	37	41	
Рабочий	164	Верхний	38	57	63	54	38	9730
	165	Нижний	39	61	76	61	42	
Опорный	–	Верхний	40	40	41	40	39	
	–	Нижний	–	–	–	–	–	
Рабочий	170	Верхний	41	61	74	52	41	18095
	171	Нижний	41	50	70	57	43	
Опорный	–	Верхний	40	41	44	43	40	
	–	Нижний	–	–	–	–	–	

Заключение

Получена математическая модель для расчета среднеинтегральной температуры поверхности и нестационарного двумерного температурного поля рабочего вала. Результаты моделирования показали, что средняя температура по длине и глубине бочки составляет 75–80 °С при градиенте перепада температур 140 °С. Экспериментальные замеры показали превышение допустимой температуры рабочих валков на 5–13 °С и наличие существенного перепада температур между краями и центром бочки (25–38 °С).

Проведенные испытания усовершенствованной системы охлаждения клетки № 6 стана 2000 горячей прокатки зафиксировали снижение температуры рабочих валков на 6–10 °С (до температуры 69–74 °С) при прокатке монтажей массой 8000–10500 т и на 4–6 °С (до температуры 70–74 °С). При прокатке монтажей суммарной массой от 11000 до 23000 т температура верхнего опорного вала не изменилась и составила 41–44 °С.

Отмечено снижение значений перепадов температуры у краев и в центре бочки вала от 25–38 до 18–25 °С. Уменьшение перепада приводит к сохранению теплового профиля вала и к уменьшению уровня термонапряжений в контактном слое.

Испытания усовершенствованной системы охлаждения не выявили наличие внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических трещин, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018/>

Библиографический список

1. Тахаутдинов Р. С., Салганик В. М., Фиркович А. Ю., Куц В. А., Гостев А. А., Гунн Г. С., Вдовин К. Н. Производство и эксплуатация валков на металлургическом предприятии. Т.2. Эксплуатация прокатных валков. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 174 с.
2. Гарбер Э. А., Гончарский А. А., Шаравин М. П. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов. – М.: Металлургия, 1991. – 256 с.
3. Abbaspour M., Saboonchi A. Work roll thermal expansion control in hot strip mill // Applied Mathematical Modelling. 2008. Vol. 32(12). P. 2652–2669.
4. Alaei H., Salimi M., Nourani A. Online prediction of work roll thermal expansion in a hot rolling process by a neural network // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 85. P. 1769–1777.
5. Салганик В. М., Чикишев Д. Н., Денисов С. В., Полецков П. П., Румянцев М. И., Куницын Г. А. Развитие теории и технологии инновационных процессов прокатного производства // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 48–51
6. Shalaevskii D. L. Investigation of thermal mode of hot-rolling mill working rolls in order to improve the accuracy of calculating the thermal profile of their barrels' surface. Izvestiya // Ferrous Metallurgy. 2023. Vol. 66, Iss. 3. P. 283–289. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-283-289
7. Колдин А. В., Латыпов О. Р., Амиров Р. Н., Шурандин Е. В. Определение параметров струйного охлаждения полосы на широкополосном стане горячей прокатки // Черные металлы. 2025. № 6. С. 29–34.
8. Колдин А. В., Терентьев Д. В., Дема Р. Р., Латыпов О. Р. Моделирование тепловых процессов при широкополосной горячей прокатке // Черные металлы. 2024. № 3. С. 40–46.

9. Koldin A. V., Amirov R. N., Latypov O. R. Study of heat transfer in jet cooling of steel surface using numerical simulation // IEEE. 2025. P. 826–830. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028568.
10. Зинягин А. Г., Мунтин А. В., Ильинский В. И., Никитин Г. С. Математическое моделирование процесса ускоренного охлаждения листа на стане-5000 // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 1. С. 9–15.
11. Wu H., Sun J., Lu X., Peng W., Wang Q., Zhang D. Predicting stress and flatness in hot-rolled strips during run-out table cooling // Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 84. P. 815–831. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.053
12. Wang J., Li X., Yi K., Elmi S. A. Research on the temperature and thermal stress of the roll quenching process of thin plates // Metals. 2024. Vol. 14. 83. DOI: 10.3390/met14010083
13. Wang J., Chang J., Zhang M., Li W., Peng Y. Analysis of fatigue damage of hot rolling work rolls coupled with wear effect // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 131, Iss. 12. P. 1423–1436. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.119
14. Hwang R., Jo H., Kim K. S., Hwang H. J. Hybrid model of mathematical and neural network formulations for rolling force and temperature prediction in hot rolling processes // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 153123–153133. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3016725.
15. Muntin A. V., Sevidov A. E., Tikhonov S. M. et al. Analysis of the specific features of wear of the working rolls of the finishing group of stands under conditions of the 1950 mill at the casting-rolling complex of the "VMZ" JSC // Metallurgist. 2021. Vol. 65, No. 3-4. P. 305–313. DOI: 10.1007/s11015-021-01158-1.
16. Muntin A. V., Zhikharev P. Yu., Ziniagin A. G., Brayko D. A. Artificial intelligence and machine learning in metallurgy. Part 1. Methods and algorithms // Metallurgist. 2023. Vol. 67, No. 5-6. P. 886–894. DOI: 10.1007/s11015-023-01576-3.
17. Zhikharev P. Yu., Muntin A. V., Brayko D. A., Kryuchkova M. O. Artificial intelligence and machine learning in metallurgy. Part 2. Application examples // Metallurgist. 2024. Vol. 67, No. 9-10. P. 1545–1560. DOI: 10.1007/s11015-024-01648-y.
18. Muntin A. V., Shamshin M. N., Ziniagin A. G. et al. Digitalization as the most important tool for the improvement of metallurgical technologies // Metallurgist. 2023. Vol. 66, No. 9-10. P. 1051–1067. DOI: 10.1007/s11015-023-01418-2.
19. Сеvidov А. Е., Мунтин А. В., Колесников А. Г. Моделирование механического износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки методами машинного обучения // Черные металлы. 2022. № 11. С. 22–27.
20. Zinyagin A. G., Muntin A. V., Borisenko N. R., Stepanov A. P., Kryuchkova M. O. A FEM-ML hybrid framework for optimizing the cooling schedules of roll-bonded clad plates // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2026. Vol. 10. 49. DOI: 10.3390/jmmp10020049
21. Приходько И. Ю., Воробей С. А., Шатохин С. Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов // Сталь. 2005. № 11. С. 72–77.
22. Капранов В. И., Петренко А. С., Сухоруков И. С. Некоторые вопросы к проблеме охлаждения прокатных валков // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 20. С. 94–97.
23. Астахов А. А., Мазур И. П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. № 11-2. С. 83–86.
24. Воробей С. А., Приходько И. Ю. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки // Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов. 2005. Т. 8. С. 232–235.
25. 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.
26. Платов С. И., Дема Р. Р., Лукьянов С. И. Разработка и внедрение технологии охлаждения прокатных валков с целью повышения их эксплуатационных характеристик на широкополосном стане 2000 ОАО «ММК» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2012. № 2 (38). С. 100–101.
27. Saboonchi A., Abbaspour M. Changing the geometry of water spray on milling work roll and its effect on work roll temperature // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 148, Iss. 1. P. 35–49.

"Chernye metally", 2026, No. 4, pp. 37–43
DOI: 10.17580/chm.2026.04.05

Development and implementation of new technical solutions aimed at increasing the work rolls durability in hot rolling mills

Information about authors

R. R. Dema, Dr. Eng., Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Transport¹, Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing², e-mail: demar78@mail.ru;

R. N. Amirov, Cand. Eng., Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Transport¹, Associate Prof., Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing², e-mail: Ruslan2246@mail.ru;

E. E. Berger, Head of the Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Transport¹, e-mail: berger.61@mail.ru;

A. V. Koldin, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Physics, Institute of Natural Science and Standardization², e-mail: koldin_av@mail.ru;

E. A. Plotnikov, Postgraduate Student, Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing², e-mail: plotnikov.ea@mmk.ru;

E. V. Shurandin, Postgraduate Student, Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing², e-mail: shurandin.ev@mmk.ru

¹ Kherson Technical University, Geniches, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract: Recently, much attention has been paid to improving the cooling systems of rolling mills. Experience shows that improper organization of the thermal regime of roll cooling can lead to highly undesirable consequences, including roll breakage. An insufficient amount of coolant or its incorrect supply causes roll overheating, distortion of the thermal profile, and the formation of fire cracks. Therefore, improving the cooling system for work rolls is an urgent task for metallurgical enterprises. To study the thermal state of the rolls of the 2000 hot rolling mill, a mathematical model was developed that allows calculating the average integral surface temperature and the non-stationary two-dimensional temperature field of the roll. The calculation results showed that the average temperature along the length and depth of the roll barrel is at the level of 75–80 °C, while the temperature gradient drop is 140 °C, which negatively affects the temperature conditions of the roll operation. An analysis of the roll performance under the conditions of the existing mill production was carried out. Based on the measurement results, it was shown that the temperature of the work rolls exceeds the permissible value by 5–13 °C, and also that there is a significant temperature difference at the edges and in the center of the roll barrel, amounting to 25–38 °C, which leads to distortion of the roll thermal profile and an increase in the level of thermal stresses in the contact layer. Based on the calculations, technical solutions were proposed: changing the installation geometry of the headers and replacing sprayers with flat-jet nozzles. The implementation of the improved cooling system design on stands No. 4–6 of the 2000 hot rolling mill made it possible to reduce the temperature of the work rolls by 6–10 °C, decrease the temperature difference along the barrel length from 38 °C to 18–25 °C, preserve the thermal profile, and reduce thermal stresses in the contact layer. The tests confirmed the absence of surface defects on the rolls, which indicates an increase in their operational durability and the effectiveness of the proposed solutions.

Key words: cooling system, collector, work roll, thermal state of the work roll, broadband hot rolling mill, mathematical model

This study was supported by grant No. 25-79-31018 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-79-31018/>.

References

- Takhautdinov R. S., Salganik V. M., Firkovich A. Yu., Kuts V. A., Gostev A. A., Gunn G. S., Vdovin K. N. Production and operation of rolls at a metallurgical plant. Vol. 2. Operation of rolling rolls. Magnitogorsk: MSTU, 1999. 174 p.
- Garber E. A., Goncharov A. A., Sharavin M. P. Technical progress of cooling systems for rolling mills. Moscow: Metallurgiya, 1991. 256 p.
- Abbaspour M., Saboonchi A. Work roll thermal expansion control in hot strip mill. *Applied Mathematical Modelling*. 2008. Vol. 32 (12). pp. 2652–2669.
- Alaei H., Salimi M., Nourani A. Online prediction of work roll thermal expansion in a hot rolling process by a neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 85. pp. 1769–1777.

- Salganik V. M., Chikishev D. N., Denisov S. V., Poletskov P. P., Romyantsev M. I., Kunitsyn G. A. Development of the theory and technology of innovative processes in rolling production. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2014. No. 1 (45). pp. 48–51
- Shalaevskii D. L. Investigation of thermal mode of hot-rolling mill working rolls in order to improve the accuracy of calculating the thermal profile of their barrels' surface. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2023. Vol. 66, Iss. 3. pp. 283–289. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-283-289.
- Koldin A. V., Latypov O. R., Amirov R. N., Shurandin E. V. Determination of parameters of jet cooling of strip on a wide-strip hot rolling mill. *Chernye Metally*. 2025. No. 6. pp. 29–34.
- Koldin A. V., Terentyev D. V., Dema R. R., Latypov O. R. Modeling of thermal processes during wide hot strip rolling. *Chernye Metally*. 2024. No. 3. pp. 40–46.
- Koldin A. V., Amirov R. N., Latypov O. R. Study of heat transfer in jet cooling of steel surface using numerical simulation. *IEEE*. 2025. pp. 826–830. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028568.
- Zinyagin A. G., Muntin A. V., Ilyinskiy V. I., Nikitin G. S. Mathematical modeling of the process of accelerated cooling of sheet on a 5000 mill. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*. 2013. No. 1. pp. 9–15.
- Wu H., Sun J., Lu X., Peng W., Wang Q., Zhang D. Predicting stress and flatness in hot-rolled strips during run-out table cooling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 84. pp. 815–831. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.053
- Wang J., Li X., Yi K., Elmi S. A. Research on the temperature and thermal stress of the roll quenching process of thin plates. *Metals*. 2024. Vol. 14. 83. DOI: 10.3390/met14010083
- Wang J., Chang J., Zhang M., Li W., Peng Y. Analysis of fatigue damage of hot rolling work rolls coupled with wear effect. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 131, Iss. 12. pp. 1423–1436. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.119
- Hwang R., Jo H., Kim K. S., Hwang H. J. Hybrid model of mathematical and neural network formulations for rolling force and temperature prediction in hot rolling processes. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 153123–153133. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3016725.
- Muntin A. V., Sevidov A. E., Tikhonov S. M. et al. Analysis of the specific features of wear of the working rolls of the finishing group of stands under conditions of the 1950 mill at the casting-rolling complex of the "VMZ" JSC. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65, No. 3–4. pp. 305–313. DOI: 10.1007/s11015-021-01158-1.
- Muntin A. V., Zhikharev P. Yu., Ziniagin A. G., Brayko D. A. Artificial intelligence and machine learning in metallurgy. Part 1. Methods and algorithms. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67, No. 5–6. pp. 886–894. DOI: 10.1007/s11015-023-01576-3.
- Zhikharev P. Yu., Muntin A. V., Brayko D. A., Kryuchkova M. O. Artificial intelligence and machine learning in metallurgy. Part 2. Application examples. *Metallurgist*. 2024. Vol. 67, No. 9–10. pp. 1545–1560. DOI: 10.1007/s11015-024-01648-y.
- Muntin A. V., Shamshin M. N., Ziniagin A. G. et al. Digitalization as the most important tool for the improvement of metallurgical technologies. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66, No. 9–10. pp. 1051–1067. DOI: 10.1007/s11015-023-01418-2.
- Sevidov A. E., Muntin A. V., Kolesnikov A. G. Simulation of mechanical wear of work rolls of a wide-strip hot rolling mill using machine learning methods. *Chernye Metally*. 2022. No. 11. pp. 22–27.
- Zinyagin A. G., Muntin A. V., Borisenko N. R., Stepanov A. P., Kryuchkova M. O. A FEM-ML hybrid framework for optimizing the cooling schedules of roll-bonded clad plates. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2026. Vol. 10. 49. DOI: 10.3390/jmmp10020049
- Prikhodko I. Yu., Vorobey S. A., Shatokhin S. E. Modeling of efficient cooling processes for sheet rolling mill rolls. *Stal*. 2005. No. 11. pp. 72–77.
- Kaplanov V. I., Petrenko A. S., Sukhorukov I. S. Some questions on the task of cooling mill rolls. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2010. No. 20. pp. 94–97.
- Astakhov A. A., Mazur I. P. Development of a model for studying the thermal state of working rolls of hot rolling mills. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 11–2. pp. 83–86.
- Vorobey S. A., Prikhodko I. Yu. Modeling the temperature mode of working rolls of a wide-strip hot rolling mill. *Nauchnye novosti. Sovremennye problemy metallurgii. Plasticheskaya deformatsiya metallov*. 2005. Vol. 8. pp. 232–235.
- Prikhodko I. Yu., Chernov P. P., Shatokhin S. E. Control of thermal profile of rolls and flatness of strips by selective feeding of emulsion. *Stal*. 2006. No. 11. pp. 87–93.
- 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 wide-strip mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2012. No. 2 (38). pp. 100–101.
- Saboonchi A., Abbaspour M. Changing the geometry of water spray on milling work roll and its effect on work roll temperature. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 148, Iss. 1. pp. 35–49.