

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

## METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31



### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА НА СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Важнейшей задачей при разработке технологий процесса листовой горячей прокатки является определение температуры полосы в технологической линии стана. В настоящей работе разработана математическая модель для расчета температурных режимов прокатки полосы на стане горячей прокатки 2300/1700 ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Математическая модель учитывает потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировке по линии стана, разогрев полосы в процессе деформации, подогрев заготовки в промежуточной подогревательной печи, падение температуры проката при прохождении охлаждающих устройств. Изменение температуры определяется и фиксируется по всей линии стана, т.е. от нагревательных методических печей до моталок горячей смотки полосы. Проверка адекватности разработанной математической модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных показала сходимость, достаточную для проведения расчетов при анализе и совершенствовании применяемых режимов прокатки и разработке новых. В статье приведен пример использования разработанной математической модели для расчета температурных параметров проката. Математическая модель может быть использована как для научных исследований, так и в качестве инструмента для инженерных расчетов температурных режимов прокатки листа.

**Ключевые слова:** температурные режимы, листовая горячая прокатка, математическая модель, прокатный стан 2300/1700.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).*

© Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В., 2020

#### Для цитирования

Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В. Математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## MATHEMATICAL MODELING OF STEEL TEMPERATURE ON A HOT SHEET ROLLING MILL

Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The most important objective of developing technologies for the process of hot sheet rolling is to determine the strip temperature in the technological line of the mill. In this paper, a mathematical model has been developed for calculating the temperature schedules of strip rolling on hot rolling mill 2300/1700 of PJSC Chelyabinsk Metallurgical Plant. The mathematical model takes into account the steel temperature loss during rolling and transportation along the mill line, heating of the strip during its deformation, heating of the billet in an intermediate reheating furnace, and a drop in the temperature of the rolled products, when passing through cooling facilities. Temperature changes are detected and recorded along the mill line, from reheating continuous furnaces to hot strip coilers. Checking the developed mathematical model adequacy by comparing the calculated and experimental data has shown convergence sufficient to carry out calculations in the analysis and improvement of the applied rolling schedules and development of new ones. The paper provides an example of using the developed mathematical model to calculate the temperature parameters of rolled products. The mathematical model can be used both for scientific research and as a tool for engineering calculations of sheet rolling temperature schedules.

**Keywords:** temperature conditions, sheet hot rolling, mathematical model, rolling mill 2300/1700.

*The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a grant for performance of the state order (basic research) under Agreement No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).*

### For citation

Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V. Mathematical Modeling of Steel Temperature on a Hot Sheet Rolling Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31>

Математическое моделирование является наиболее перспективным направлением в процессах создания новых и совершенствования существующих технологий производства прокатной продукции. Моделирование температурных процессов, происходящих в прокатываемом металле в технологической цепочке, наиболее важны для обеспечения высокого качества, требуемой структуры и свойств готового проката [1–8]. Методы расчета температурных режимов горячей прокатки предложены в различных научных работах [9–15]. Анализ показал наличие моделей, основанных на кибернетическом подходе к их построению, т.е. на статистической обработке результатов эксперимента, или на гносеологическом подходе, т.е. на теоретических зависимостях процессов теплопередачи. Известные модели, как правило, достаточно сложны для использования в инженерных расчетах, а также в системах автоматического управления.

Различаются модели и по степени учета составляющих температурного баланса. Значительная часть методов основывается на учете потерь тепла только излучением и имеет в своей структуре эмпирические коэффициенты, которые учитывают влияние других составляющих. Существуют методы, учитывающие уменьшение температуры за счет излучения и ее повышение в результате пластической деформации металла. Также ряд методов учитывает теплопередачу между полосой и рабочим инструментом, а также за счет конвективного теплообмена движущейся полосы и воздуха.

Целью настоящей работы является разработка математической модели изменения температуры металла в процессе горячей листовой прокатки в условиях стана 2300/1700.

Схема расположения оборудования стана горячей прокатки 2300/1700 представлена на **рис. 1**.

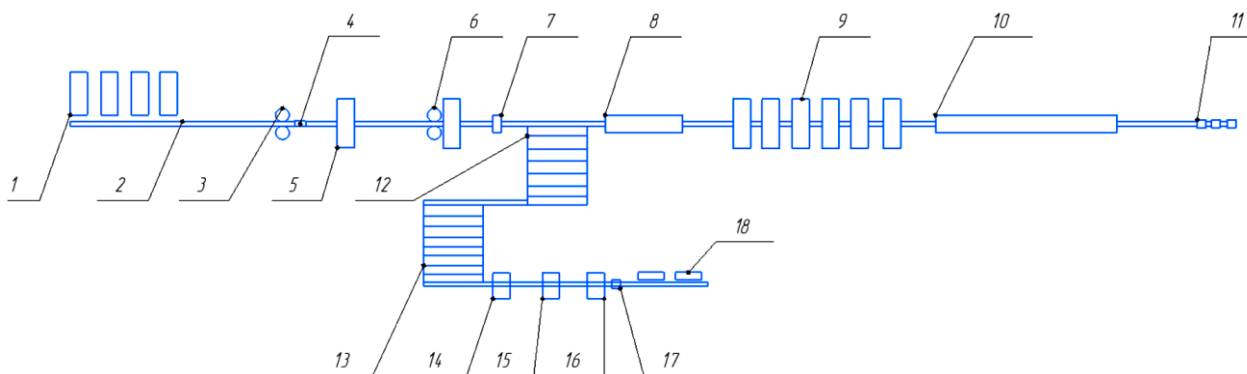


Рис. 1. Схема стана горячей листовой прокатки 2300/1700: 1 – методические толкательные печи; 2 – рольганг; 3 – черновой окалиноломатель; 4 – гидросбив окалины; 5 – уширительная клеть стана 2300; 6 – универсальная клеть стана 2300; 7 – гильотинные ножницы горячей резки; 8 – проходная роликовая печь; 9 – непрерывный стан 1700; 10 – установка ламинарного охлаждения; 11 – моталки горячей смотки полосы; 12 – холодильник; 13 – инспекторский стол; 14 – листопрямляющая машина; 15 – дисковые ножницы; 16 – гильотинные ножницы холодной резки; 17 – клеймитель; 18 – листоукладчик с карманами

Fig. 1. Hot rolling mill 2300/1700: 1 is continuous pusher furnaces; 2 is a roller conveyor; 3 is a rough scale breaker; 4 is a descaler; 5 is a spreading stand of mill 2300; 6 is a universal stand of mill 2300; 7 is hot cutting guillotine shears; 8 is a continuous roller furnace; 9 is continuous mill 1700; 10 is a laminar cooling unit; 11 is hot strip coilers; 12 is a cooling bed; 13 is an inspection table; 14 is a sheet straightening machine; 15 is circular shears; 16 is cold cutting guillotine shears; 17 is a marking machine; 18 is a stacker with pockets

Общая постановка задачи, приведенная в литературе [16] с адаптацией к процессу горячей листовой прокатки, выглядит следующим образом:

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t_{п_j} + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t_{п_k} + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t_{п_l} - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t_{оx_z}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_n$  – потери температуры в процессе прокатки и транспортировки в линии стана;  $\Delta t_p$  – разогрев полосы в процессе его деформации;  $\Delta t_n$  – повышение температуры в подогревающих устройствах технологического потока стана;  $\Delta t_{ox}$  – понижение температуры металла в охлаждающих устройствах стана;  $i = \overline{1, n}$  – факторы, влияющие на изменение температуры раската;  $j = \overline{1, n_1}$  – факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана;  $k = \overline{1, n_2}$  – факторы, вызывающие разогрев раската в процессе пластической деформации;  $l = \overline{1, n_3}$  – подогревающие устройства в линии прокатного стана;  $z = \overline{1, n_4}$  – охлаждающие установки в линии прокатного стана.

Проанализировав факторы, влияющие на температуру металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана, получим формулу для расчета изменения температуры металла в  $i$ -й точке технологического процесса [17]:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{из} - \Delta t_{кон} - \Delta t_{конт} + \Delta t_{деф} + \Delta t_n - \Delta t_{ox}, \quad (2)$$

где  $t_{i-1}$  – температура полосы в  $i-1$ -й точке технологического процесса;  $\Delta t_{из}$  – потери температуры за счет излучения тепловой энергии;  $\Delta t_{кон}$  – потери температуры за счет конвективного теплообмена с окружающей средой;  $\Delta t_{конт}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена;  $\Delta t_{деф}$  – разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения;  $\Delta t_n$  – повышение температуры в подогревающем устройстве;  $\Delta t_{ox}$  – понижение температуры в охлаждающем устройстве.

После выхода заготовки из нагревательной печи при ее транспортировке к стану 2300 первой реверсивной уширительной клетки происходит падение температуры за счет излучения и конвекции.

Изменение температуры за счет излучения определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot h_3 \cdot b_3 + h_3 + b_3 \cdot l_3 \cdot \frac{l_{тр}}{v_{тр}}}{c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3 \cdot b_3} \times \left[ \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\xi$  – степень черноты поверхности металла;  $\rho$  – плотность металла;  $l_3, h_3, b_3$  – длина, высота, ширина заготовки соответственно;  $v_{тр}$  – скорость транспортировки заготовки;  $l_{тр}$  – расстояние транспортировки;  $t_{н}$  – температура нагрева заготовки в печи;  $t_c$  – температура окружающей среды;  $c$  – теплоемкость металла.

Изменение температуры за счет конвекции определяется по формуле

$$\Delta t_{кон} = \frac{0,045 \cdot \left( \frac{4 \cdot v_{тр} \cdot h_3 \cdot b_3}{h_3 + b_3 \cdot v_{тр}} \right)^{0,62} \cdot h_3 \cdot b_3 + h_3 + b_3 \cdot l_3}{c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3^2 \cdot b_3^2} \times$$

$$\times h_3 + b_3 \cdot \frac{l_{тр}}{v_{тр}} \cdot \lambda_{в} \cdot t_{н} - t_c, \quad (4)$$

где  $\lambda_{в}$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $v_{в}$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Изменение температуры металла за счет прохождения заготовки через гидросбив можно определить по формуле

$$\Delta t_r = \frac{\alpha_{кин} \cdot b_3 \cdot l_3}{v_{тр}} \cdot T_3 - T_{нас}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{кин}$  – коэффициент теплоотдачи от гидросбива к полосе;  $T_{нас}$  – температура насыщения.

Прокатка полосы в реверсивной уширительной клети дуо стана 2300 происходит за несколько проходов. При прокатке происходит падение температуры не только за счет излучения и конвекции, но и за счет теплообмена с валками, также происходит нагрев металла за счет энергии деформирования.

Изменение температуры за счет излучения в реверсивной клети дуо находится по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot \left( \tau_{п} + \frac{l_1}{v_1} \right) \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где  $l_0, h_0, b_0$  – начальная длина, высота, ширина заготовки на входе в клеть, соответственно;  $l_1$  – длина раската на выходе из очага деформации;  $v_1$  – скорость раската на выходе из очага де-

формации;  $\tau_{п}$  – время паузы при реверсе раската;  $t_0$  – температура заготовки на входе в клеть.

Изменение температуры за счет конвекции при прокатке в реверсивной клети дуо стана 2300 находится по формуле [18]

$$\Delta t_{кон} = \frac{1,32 \cdot \lambda_{в} \cdot \sqrt{\frac{v_1}{v_{в} \cdot b_0}} \cdot \left( \tau_{п} + \frac{l_1}{v_1} \right) \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \cdot t_0 - t_c}{c \cdot \rho}, \quad (7)$$

При горячей листовой прокатке потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками в очаге деформации определяются по формуле [18]

$$\Delta t_{вал} = \frac{\alpha_{в}}{c \cdot t_0 \cdot \rho \cdot v_1} \cdot \frac{b_0 + b_1 \cdot \sqrt{R \cdot h_0 - h_1}}{h_1 \cdot b_1} \cdot t_0 - t_{в}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{в}$  – коэффициент теплопередачи между полосой и рабочими валками;  $R$  – радиус рабочих валков;  $h_1, b_1$  – толщина и ширина раската на выходе из клети соответственно;  $t_{в}$  – температура рабочих валков.

Разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения при горячей листовой прокатке определим по формуле [19]

$$\Delta t_{деф} = \frac{p_{ср} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}}{c \cdot \rho}, \quad (9)$$

где  $p_{ср}$  – среднее удельное усилие прокатки, Па.

Расчет температуры металла при прокатке в универсальной реверсивной клети стана 2300 определяется по формулам (3)–(9).

За то время пока подкат идет из универсальной реверсивной клети стана 2300 к непрерывному стану 1700, в межклетевом промежутке стана 1700, в промежутках между станом и моталками горячей смотки происходит падение температуры за счет излучения и конвективного теплообмена с окружающей средой.

Изменение температуры за счет излучения определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot \left( \frac{h_0 + b_0 \cdot l}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{2} \right) \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

где  $v_0$  – скорость полосы на входе в клети и моталки горячей смотки;  $l$  – расстояние движения полосы между клетями стана.

Изменение температуры за счет конвективного теплообмена определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{\text{кон}} = \frac{1,32 \cdot \lambda_{\text{в}}}{c \cdot t_0 \cdot \rho \cdot \sqrt{v_{\text{в}} \cdot b_0 \cdot v_0}} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0 \cdot l}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{2} \right) \cdot t_0 - t_c \quad (11)$$

Для расчета изменения температуры в стане непрерывном стане 1700 за счет разогрева при деформации полосы и контактного теплообмена с валками можно воспользоваться формулами (7) и (8).

Для проверки адекватности математической модели были проведены расчеты температурных режимов на стане 2300/1700 ПАО «ЧМК» для стали марки 12Х18Н10Т. Для расчета взяты сляб размерами 170×1540×3700 мм для прокатки в рулон размерами 5×1540 мм. На **рис. 2** приведены результаты расчетов, показывающих изменение температуры металла от нагревательной печи до выхода из универсальной клетки стана 2300. На **рис. 3** показано изменение температуры металла от подогревательной печи до моталок горячей смотки полосы, полученное расчетом по модели.

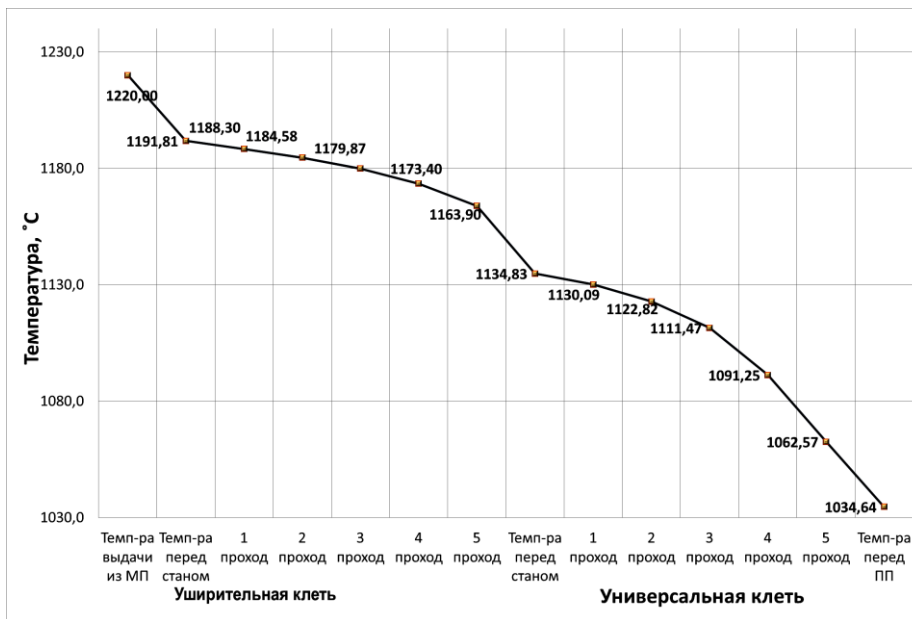


Рис. 2. График изменения температуры металла на стане 2300  
 Fig. 2. A steel temperature curve on mill 2300

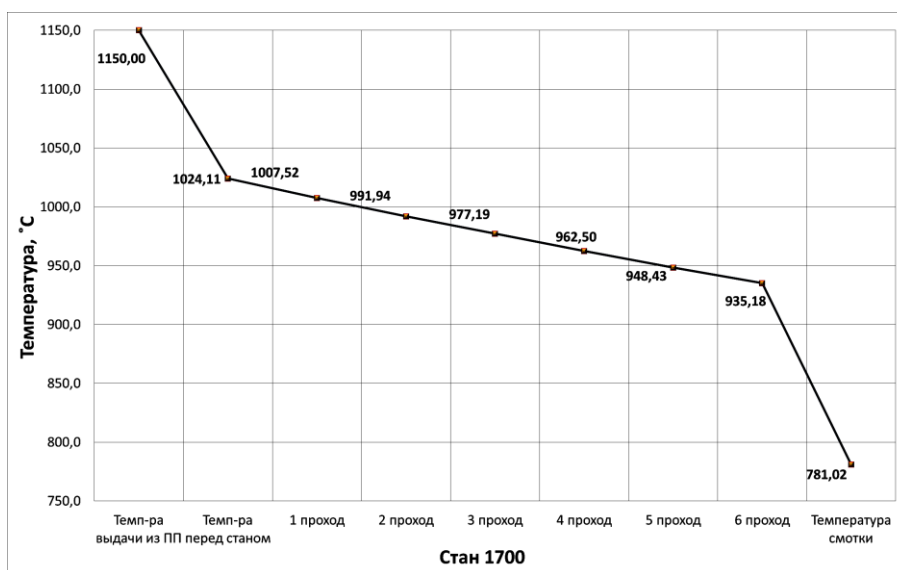


Рис. 3. График изменения температуры металла на стане 1700  
 Fig. 3. A steel temperature curve on mill 1700

### Заключение

Разработана математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки. Математическая модель учитывает потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировке по линии стана, разогрев полосы в процессе деформации, подогрев заготовки в промежуточной подогревательной печи, падение температуры проката при прохождении охлаждающих устройств. Разработанная математическая модель прошла промышленную проверку адекватности в условиях стана 2300/1700 ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Математическая модель позволяет определять и фиксировать температуру металла по всей линии стана, т.е. от нагревательных методических печей до моталок горячей смотки полосы. Разработанная модель может быть использована как для научных исследований, так и в качестве инструмента для инженерных расчетов температурных режимов прокатки листа.

Экспериментально замеры температур осуществлялись в условиях прокатного цеха № 4 ПАО «ЧМК» с помощью радиационного пирометра ТЕРА-50. Замеры проводились в уширительной и универсальной клетях. Фактические замеры при прокатке на стане 1700 осуществлялись после 8-й клетки и на моталках горячей смотки полосы. В **таблице** показано сравнение расчетных и экспериментальных температур металла при прокатке на стане 2300/1700. Проверка адекватности модели показала, что разработанная математическая модель может быть использована для проектирования новых и совершенствования существующих режимов прокатки.

Разработанная математическая модель может быть использована для анализа и совершенствования используемых на стане 2300/1700 режимов прокатки, а также для разработки новых при освоении нового сортамента листового проката. В качестве примера приведены результаты расчета влияния температуры нагрева промежуточного проката в подогревательной печи между станами 2300 и 1700 на температуру конца прокатки (**рис. 4**).

Таблица. Сравнение расчетной и экспериментальной температуры металла в контрольных точках стана 2300/1700  
Table. Calculated and experimental steel temperatures at control points of mill 2300/1700

Температура в контрольной точке стана, °С	Уширительная клетка стана 2300	Универсальная клетка стана 2300	Клетка № 8 стана 1700	Моталки горячей смотки
Расчетная	1163,9	1062,6	938,5	782,3
Экспериментальная	1130...1100	1100...1050	920...900	800...760

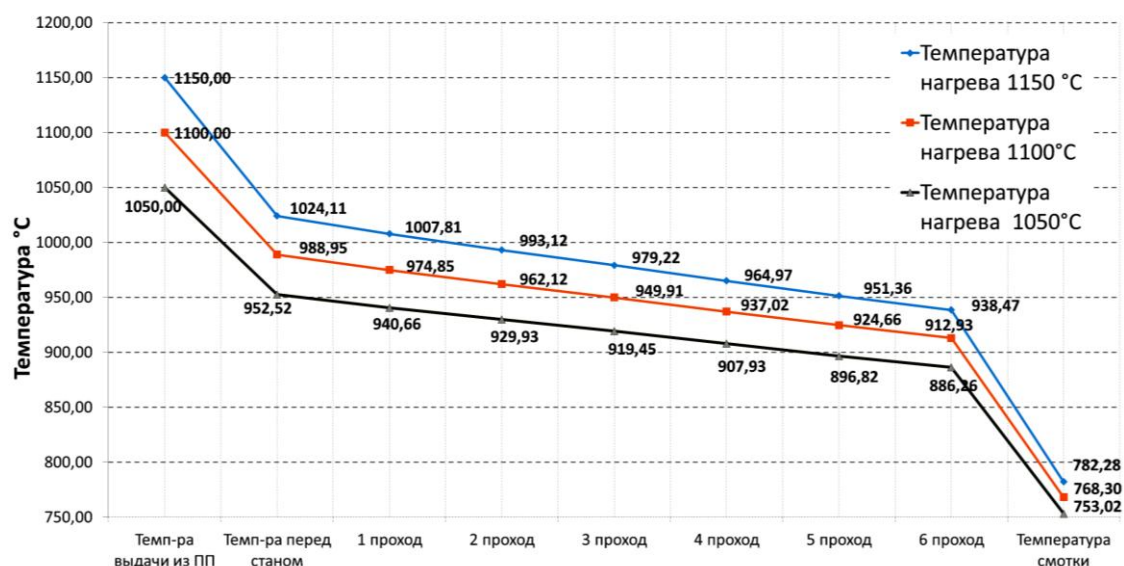


Рис. 4. Влияние температуры нагрева проката в подогревательной печи на температуру металла при прокатке на стане 1700

Fig. 4. Effect of heating temperature of rolled products in a preheating furnace on steel temperature during rolling on mill 1700

## Список литературы

1. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1994. 656 с.
2. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
3. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание. В 2-х кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
4. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство: учебник / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. Киев: Выща шк., 1988. 352 с.
5. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
6. Коцарь С.Л., Белянский А.Д., Мухин Ю.А. Технология листопрокатного производства. М.: Металлургия, 1997. 272 с.
7. Выбор стратегии и режимов охлаждения проката для достижения требуемого комплекса потребительских свойств / В.В. Курбан, Д.С. Федоров, В.М. Салганик, А.М. Песин // Черная металлургия. 2011. № 4 (1336). С. 64–69.
8. Радионова Л.В., Бужланова Ю.В. Применение математических моделей для прогнозирования микроструктуры и механических свойств катанки из высокоуглеродистых марок стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2008. № 4 (24). С. 73–75.
9. Математическая модель расчета температуры раската в процессе горячей листовой прокатки методом критериальных уравнений / И.А. Сердюк, А.С. Хаджинов, С.Г. Дворников, А.А. Холодный, А.Г. Присяжный // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2011. № 2 (23). С. 80–86.
10. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, И.Ю. Андришин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 59–73.
11. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов и др. // Вестник ИГЭУ, 2013. Вып. 1. С. 98–103.
12. Ограничение минимальных скоростей электроприводов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андришин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 20–23.
13. Генкин А.Л. Информативность энергосиловых параметров при управлении температурно-скоростным режимом горячекатаной полосы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 8. С. 45–48.
14. Радионова Л.В., Сарапулов О.А. Математическая модель охлаждения катанки на мелкосортном стане // Наука и производство Урала. 2014. № 10. С. 171–174.
15. Автоматическое управление геометрией проката на толстолистовом стане 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов, Л.В. Радионова // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления «МКПУ-2011», 2011. С. 307–309.
16. Дубинский Ф.С., Соседкова М.А. Моделирование температурных режимов с целью оптимизации сортовой прокатки // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XIN International scientific conference; Ченстохова (Польша). 2013. С. 353–357.
17. Sosedkova M.A., Radionova L.V., Lisovskaya T.A. Mathematical Model of Hot Rolling Temperature Parameters // Solid State Phenomena. 2017. Т. 265 SSP. P. 1026–1033.
18. Mathematical Model of Temperature Conditions of Sheet Mills with Furnace Coilers / M.A. Sosedkova, A.S. Grigorenko, L.V. Radionova, T.A. Lisovskaya, V.D. Lezin // Materials Science Forum, 2020, 989 MSF, pp. 711–718.
19. Венцель Х. Прокатка и прокатное оборудование // ВИНТИ. Экспресс-информация. 1965. № 27. С. 8–43.

## References

1. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: uchebnik dlya vuzov* [Rolling technology: the textbook for universities]. Moscow: Metallurgy, 1994, 656 p. (In Russ.)
2. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. et al. *Teoriya prokatki: spravochnik* [Theory of rolling: a reference book]. Moscow: Metallurgy, 1982, 335 p. (In Russ.)
3. Konovalov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie. V 2-kh kn. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanых листов i polos* [The reference book for rolling engineers. Reference edition. In 2 books. Book 1. Production of hot-rolled sheets and strips]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 640 p. (In Russ.)
4. Safyan M.M., Mazur V.L., Safyan A.M., Molchanov A.I. *Tekhnologiya protsessov prokatki i volocheniya. Listoprotkatnoe proizvodstvo: uchebnik* [Technology of rolling and drawing processes. Sheet rolling: the textbook]. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988, 352 p. (In Russ.)
5. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteyno-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling facilities for the production of steel strips]. Moscow: Bauman MSTU, 2003, 506 p. (In Russ.)

6. Kotsar S.L., Belyansky A.D., Mukhin Yu.A. *Tekhnologiya listoprokatnogo proizvodstva* [Sheet rolling technology]. Moscow: Metallurgy, 1997, 272 p. (In Russ.)
7. Kurban V.V., Fedorov D.S., Salganik V.M., Pesin A.M. The selection of the cooling strategy and modes for rolled products to achieve the required complex of consumer properties. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2011, no. 4 (1336), pp. 64–69. (In Russ.)
8. Radionova L.V., Buzhlanova Yu.V. Application of mathematical models for prediction of microstructure and mechanical properties of rods of high carbon steel grades. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 4 (24), pp. 73–75. (In Russ.)
9. Serdiuk I.A., Khadzhinov A.S., Dvornikov S.G., Kholodnyi A.A., Prisyazhnyi A.G. Mathematical model of calculating the temperature of rolling in the process of hot sheet rolling by the method of criterial equations. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»* [Bulletin of Priazovsky State Technical University. Technical Sciences], 2011, no. 2 (23), pp. 80–86. (In Russ.)
10. Radionov A.A., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu. et al. Mathematical modeling of the interrelated electric and mechanical systems of a continuous sub-group of the rolling mill stands. Part 1. Development of a mathematical model. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Power Engineering], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 59–73. (In Russ.)
11. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Radionov A.A. et al. Coordination of speed modes of electric drives for stands of a continuous group of the rolling mill. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISEU], 2013, no. 1, pp. 98–103. (In Russ.)
12. Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Limiting minimum speeds of electric drives of mill 2000, when rolling a pipe billet. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3, pp. 20–23. (In Russ.)
13. Genkin A.L. Information on energy-power parameters in controlling the temperature-speed mode of hot-rolled strip. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in the Industry], 2009, no. 8, pp. 45–48. (In Russ.)
14. Radionova L.V., Sarapulov O.A. Mathematical model of rod cooling in a small section mill. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and Manufacturing of the Urals], 2014, no. 10, pp. 171–174. (In Russ.)
15. Gasiyarov V.R., Usatiy D.Yu., Radionov A.A., Radionova L.V. Automatic control of the rolling geometry on a 5000 mm plate mill. *Materialy 4-y Vserossiyskoy multikonferentsii po problemam upravleniya "MKPU-2011"* [Proceedings of the Fourth All-Russian Multi-Conference on Management Problems MCMP-2011], 2011, pp. 307–309. (In Russ.)
16. Dubinskiy F.S., Sosedkova M.A. Temperature simulation to optimize long product rolling. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XIV International scientific conference, Czestochowa (Poland), pp. 353–357 (2013).
17. Sosedkova M.A., Radionova L.V., Lisovskaya T.A. Mathematical model of hot rolling temperature parameters. *Solid State Phenomena*, 265, pp. 1026–1033 (2017).
18. Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V., Lisovskaya T.A., Lezin V.D. Mathematical model of temperature conditions of sheet mills with furnace coilers. *Materials Science Forum*, 989, pp. 711–718 (2020).
19. Wenzel H. Rolling and rolling equipment. *VINITI. Ekspres-informatsiya* [The All-Union Institute of Scientific and Technical Information. Express information], 1965, no. 27, pp. 8–43. (In Russ.)

Поступила 23.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 23/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Радионова Людмила Владимировна** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: radionovalv@susu.ru ORCID 0000-0001-9587-2925

**Соседкова Марина Алексеевна** – старший преподаватель,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: sosedkovama@susu.ru

**Григоренко Александр Сергеевич** – студент,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: GrAS1996@mail.ru ORCID 0000-0002-0052-669X

**Lyudmila V. Radionova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: radionovalv@susu.ru, ORCID 0000-0001-9587-2925

**Marina A. Sosedkova** – Senior Lecturer  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: sosedkovama@susu.ru

**Alexander S. Grigorenko** – student  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: GrAS1996@mail.ru, ORCID 0000-0002-0052-669X