

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 621.771.09

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69



ВЫБОР СХЕМЫ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РУЛОННОГО ПРОКАТА ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П.

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

Аннотация. Постановка задачи. В современных условиях процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением широко используется в мировой практике прокатного производства. При разработке технологических режимов и освоении производства инновационных видов проката одной из важнейших научно-практических задач является выбор температурных параметров процесса и схемы охлаждения, обеспечивающих формирование требуемой структуры и свойств готовой продукции. Вместе с тем остается актуальной проблема прогнозирования температурного состояния металла и достижения заданных параметров обработки в промышленных условиях. **Цель работы.** Выбор схемы процесса ускоренного охлаждения рулонного проката на основе моделирования теплого состояния металла по сечению полосы. **Используемые методы.** Моделирование проведено в программном комплексе Deform-3D. В ходе исследования использована разработанная авторами модель расчета температурного поля, формируемого в процессе контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения стали в условиях широкополосного стана горячей прокатки 2000. Модель учитывает процессы тепловыделения при прокатке, теплоотдачу валкам, а также охлаждение металла при контакте с водой и воздухом. **Результаты.** Предложена конечно-элементная модель, позволяющая прогнозировать скорость охлаждения и распределение температурного поля по сечению проката. На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования выбрана схема охлаждения, предусматривающая последовательное включение в работу первых 19-ти секций установки. Это обеспечивает достижение требуемых режимов обработки с учетом конструктивных особенностей используемого оборудования. В ходе опытно-промышленной апробации показана высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных. Погрешность полученных данных не превышает 3%.

Ключевые слова: Deform-3D, рулонный прокат, установка ускоренного охлаждения, схема охлаждения, поле температур, скорость охлаждения

Работа подготовлена в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова при финансовой поддержке Минобрнауки России, предоставляемой в рамках выполнения комплексного проекта по организации высокотехнологичного производства (Соглашение от 25.06.2021 г. № 075-11-2021-063).

© Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П., 2023

Для цитирования

Выбор схемы ускоренного охлаждения рулонного проката из низколегированной стали на основе конечно-элементного моделирования / Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Адищев П.Г., Тетюшин К.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 63-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69>



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

SELECTING AN ACCELERATED COOLING SCHEDULE FOR LOW-ALLOY STEEL COILS BASED ON FINITE ELEMENT MODELING

Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Adishchev P.G., Tetyushin K.P.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement. In the current conditions, the process of controlled rolling with accelerated cooling is widely used in the world practice of rolling divisions. One of the most important scientific and practical tasks in the development of technological modes and learning of the production of innovative types of rolled products is to select temperature parameters of the process and the cooling schedule, ensuring the formation of the required structure and properties of finished products. At the same time, the issue of predicting the temperature state of steel and achieving the specified treatment parameters in industrial conditions remains relevant. **Objective.** The research is aimed at selecting the accelerated cooling process schedule for coils based on the simulation of the thermal state of steel along the strip section. **Methods Applied.** Modeling was carried out in the Deform-3D software suite. The authors used in the research their finite element model developed for calculating the thermal field during controlled rolling and accelerated cooling of steel on hot strip mill 2000. The model factors into the processes of heat release during rolling, heat transfer to the rolls, as well as cooling of steel, when in contact with water and air. **Results.** The authors proposed a finite element model used to predict the cooling rate and the distribution of the temperature field along the section of rolled products. Having analyzed the results of finite element modeling, the authors selected a cooling schedule providing for enabling of the first 19 sections of the unit in a sequential order. This contributes to achieving the required treatment schedules subject to the design features of the operating equipment. The experimental industrial tests showed high convergence of calculated and experimental data. An error of the obtained data does not exceed 3%.

Keywords: Deform-3D, coils, accelerated cooling unit, cooling schedule, temperature field, cooling rate

The research was conducted at Nosov Magnitogorsk State Technical University and funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of the integrated project aimed at organizing high-technology production facilities (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).

For citation

Alekseev D. Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Adishchev P.G., Tetyushin K.P. Selecting an Accelerated Cooling Schedule for Low-Alloy Steel Coils Based on Finite Element Modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 63-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-63-69>

Введение

В современных условиях процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением широко используется в мировой практике прокатного производства. При разработке технологических режимов и освоении производства инновационных видов проката одной из важнейших научно-практических задач является выбор температурных параметров процесса и схемы охлаждения, обеспечивающих формирование требуемой структуры и свойств готовой продукции. Вместе с тем в связи с конструктивными особенностями установок ускоренного охлаждения (УО) остается актуальной проблема прогнозирования температурного состояния металла и достижения заданных температурных параметров обработки в промышленных условиях. К примеру, в условиях широкополосного стана горячей прокатки (ШСП) 2000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») температура проката регистрируется пирометрами на следующих участках (**рис. 1**):

- на выходе из последней чистовой прокатной клетки;
- после участка №1 установки ускоренного охлаждения перед моталкой;
- после участка №2 установки ускоренного охлаждения перед моталкой.

Температуры, регистрируемые пирометрами на поверхности проката, могут существенно отличаться от температур, формируемых в процессе охлаждения по сечению металла. С целью теоретического исследования температурного поля по сечению проката целесообразно применить методы, основанные на решении уравнений теплового баланса [1-4]. Одним из многочисленных программных продуктов, позволяющих реализовать рассматриваемый подход, является программный комплекс Deform-3D [5-8].

В связи с вышеизложенным целью работы является выбор схемы процесса ускоренного охлаждения рулонного проката на основе моделирования теплового состояния металла по сечению полосы.

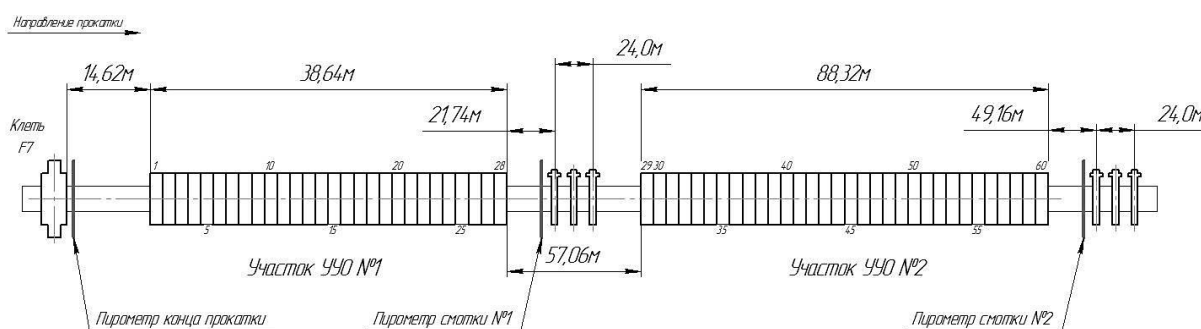


Рис. 1. Схема установки ускоренного охлаждения широкополосного стана горячей прокатки 2000
 Fig. 1. The accelerated cooling unit of hot strip mill 2000

Теория, материалы и методы исследования

В ходе исследования использована предложенная авторами конечно-элементная модель расчета теплового поля при контролируемой прокатке и ускоренном охлаждении рулонного проката из низколегированной стали [9]. Модель учитывает процессы тепловыделения при прокатке стали, теплоотдачу валкам, а также охлаждение металла при контакте с водой и воздухом.

Моделирование выполнено для проката из низколегированной стали на основе С-Mn-Cr-Nb-Ti. Реологические свойства заготовки задавались в виде кривых упрочнения с учетом температуры, скорости и степени деформации. Режимы охлаждения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы ускоренного охлаждения исследуемой стали
 Table 1. Accelerated cooling schedules for steel under study

Температура, °С		Скорость ускоренного охлаждения $V_{охл}$, °С/с
начала ускоренного охлаждения $T_{КП}$	конца ускоренного охлаждения $T_{СМ}$	
880	550	25

Основные принципы и допущения:

- геометрические размеры заготовки: 8×2×200 мм;
- температура охлаждающей воды составляла 20°С;
- тип объекта: вязкопластичный.

УУО была разделена на 6 последовательных участков, характеризующихся различными условиями охлаждения (слева направо на рис. 1):

- участок №1, граничащий с началом первой секции охлаждения;
- участок №2, совпадающий с участком УУО №1;
- участки №3 и 4, расположенные в пространстве между участками УУО №1 и УУО №2 и раз-

ленные пирометром смотки №1;

- участок №5, совпадающий с участком УУО №2;
- участок №6 между участком УУО №2 и пирометром смотки №2.

Для каждого участка рассчитаны коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{УО}$ [10]:

$$\alpha_{УО} = k \cdot d_c^{0,719} \cdot \lambda_w \times \left[v_w \cdot \left(1 + 0,0337 t_w + 0,000221 t_w^2 \right) \right]^{-1,719} \cdot \left(\frac{100 - t_w}{t_w + 273} \right)^{0,964}$$

где k – эмпирический коэффициент; d_c – диаметр сопла, м; λ_w – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); v_w – скорость течения воды, м/с; t_w – температура воды, °С; t_w – температура полосы, °С.

Учитывалось, что при охлаждении металла формируются три основные области:

1. Область соударения воды с полосой, характеризующаяся высокими значениями $\alpha_{УО}$.
 2. Область пленочного кипения, для которой $\alpha_{УО}$ рассчитывались как теплоотдача через слой пара $\alpha_{пар}$.
 3. Участки, свободные от воды, характеризующиеся коэффициентами теплоотдачи на воздухе $\alpha_{возд}$.
- Значения рассмотренных коэффициентов представлены в табл. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследования были смоделированы две типовые схемы процесса ускоренного охлаждения полосы, используемые в условиях ШСПП 2000 ПАО «ММК». Количество и порядок включения секций установки ускоренного охлаждения, а также полученные расчетные значения скоростей охлаждения $V_{расч}$, °С/с, представлены на рис. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов теплоотдачи при различной температуре полосы
 Table 2. Heat exchange coefficients at various strip temperatures

Коэффициент	Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{УО}$, кВт/(м ² ·К), при температуре полосы, °С									
	30	110	200	300	400	500	600	700	800	990
$\alpha_{возд}$	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,027	0,031	0,038	0,046	0,067
$\alpha_{пар}$	–	0,299	0,285	0,285	0,286	0,289	0,292	0,297	0,303	0,319
$\alpha_{УО}$	5,29	4,22	3,45	2,86	2,45	2,15	1,91	1,72	1,56	1,34

T _{КП} , °C	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																												T _{см} , °C	V _{расч} , °C/с		
		Верх																															
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	553	9,9		
		1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0				
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0			1	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		Участок №2 установки ускоренного охлаждения																															
		Верх																															
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
		Низ																															

а

T _{КП} , °C	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																												T _{см} , °C	V _{расч} , °C/с		
		Верх																															
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	555	11,9		
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0			1	
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0			1	0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
		Участок №2 установки ускоренного охлаждения																															
		Верх																															
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
		Низ																															

б

Рис. 2. Исследуемые схемы включения секций установки ускоренного охлаждения: а – схема №1; б – схема №2 (0 – полусекция выключена, 1 – полусекция включена)

Fig. 2. The studied schedules of enabling the sections of the accelerated cooling unit: а is schedule No. 1; б is schedule No. 2 (0 is the disabled half-section, 1 is the enabled half-section)

Как следует из рис. 2, расчетные скорости охлаждения центральной области заготовки составила для схемы №1 – 9,9°С/с, для схемы №2 – 11,9°С/с. Таким образом, применение типовых схем включения секций УУО не обеспечило достижение заданной скорости охлаждения в центральной области полосы (V_{охл} = 25,0°С/с). В связи с этим была предложена новая схема охлаждения №3, предусматривающая последовательное включение в работу первых 19-ти секций охлаждения (рис. 3).

В результате моделирования схемы №3 получено, что расчетное значение скорости охлаждения центральной области проката составило 25,9°С/с, что соответствует заданным режимам обработки.

Расчетные кривые охлаждения центральной области полосы представлены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, при использовании схем №1 и 2 требуемое значение температуры конца ускоренного охлаждения достигается в первой половине

участка №2 УУО. В связи с конструктивными особенностями оборудования в температурном интервале 700-680°С для схемы №1 и 660-645°С для схемы №2 охлаждение водой прерывается. Дальнейшее охлаждение происходит на воздухе со скоростью порядка 1,5°С/с.

При охлаждении заготовки по схеме №3 кривая изменения температуры центральной области проката имеет близкий к линейному характер. На выходе из последней включенной секции УУО температура металла составляет 600°С. В дальнейшем скорость охлаждения снижается, а достижение требуемой температуры конца ускоренного охлаждения происходит на выходе из участка №1 УУО. Выбранная схема №3 включения секций была рекомендована для проведения опытно-промышленного эксперимента в условиях ШСПП 2000 ПАО «ММК». В ходе сравнения экспериментальных и расчетных значений установлено, что погрешность полученных данных не превышает 3%.

T _{кп} , °C	V _{прокатки} , м/с	Участок №1 установки ускоренного охлаждения																																		
		Верх																																		
880	4,53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28							
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28							
		Участок №2 установки ускоренного охлаждения																												T _{см} , °C	V _{расч} , °C/с					
		Верх																																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	552	25,9	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60			
		Низ																																		

Рис. 3. Схема №3 включения секций установки ускоренного охлаждения (0 – полусекция выключена, 1 – полусекция включена)

Fig. 3. Schedule No. 3 of enabling the sections of the accelerated cooling unit (0 is the disabled half-section; 1 is the enabled half-section)

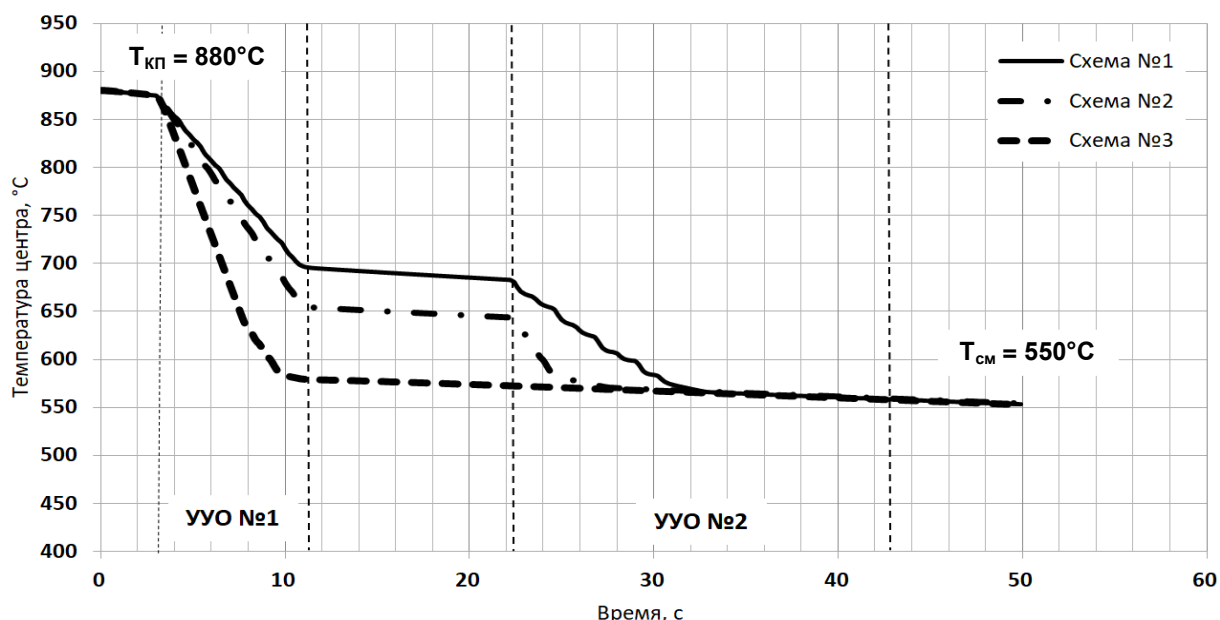


Рис. 4. Температура центра полосы при ускоренном охлаждении по схемам № 1-3

Fig. 4. Strip center temperature during accelerated cooling according to schedules No. 1-3

Заключение

В результате моделирования исследуемого процесса в программном комплексе Deform-3D выбрана схема ускоренного охлаждения рулонного проката, обеспечивающая достижение требуемых параметров обработки с учетом конструктивных особенностей ШСПП 2000 ПАО «ММК».

Список литературы

1. Подкустов В.П., Алексеев П.Л. Определение температурного поля проката // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. №9. С. 40-42.
2. Определение температурного поля раската в процессе прокатки на четырехвалковом стане / Пржигода М., Редр М., Томан З. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1979. № 5. С. 56-60.

3. Yanagimoto J., Liu J., Ito T. FE-based analysis for the microstructure evolution in hot bar rolling // ISIJ International. 2000, vol. 40, no. 1, pp. 65-70.
4. Prediction of microstructure distribution in the trough-thickness direction during and after hot rolling in carbon steels / Nanba S., Kitamura M., Shimada M. et al. // ISIJ International. 1992, vol. 40, no. 10, pp. 1013-1018.
5. Srivastava A., Sinha A., Verma S. A mini-review on numerical approach of microstructure prediction in eutectoid steel // Materials Today: Proceedings, 2022, part 5, vol. 50, pp. 2241-2248.
6. FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results / Huiping L., Guoqun Z., Shanting N., Chuanzhen H. // Materials Science and Engineering: A. 2007, vol. 452-453, pp. 705-714.
7. Моделирование процесса охлаждения при закалке листовой стали в условиях толстолистового стана

- 5000 / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Гулин А.Е. и др. // Черные металлы. 2023. №2. С. 33-37.
8. Анализ схем охлаждения листового проката на основе компьютерного моделирования / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адищев П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 102-109.
 9. Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки / Алексеев Д.Ю., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г. и др. // Черные металлы. 2022. №5. С. 55-60.
 10. Fundamental of momentum, heat and mass transfer / Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. // 5th Edition. New York: J. Willey & Sons Inc., 2007. 729 p.
 4. Nanba S., Kitamura M., Shimada M. et al. Prediction of microstructure distribution in the trough-thickness direction during and after hot rolling in carbon steels. *ISIJ International*. 1992;40(10):1013-1018.
 5. Srivastava A., Sinha A., Verma S. A mini-review on numerical approach of microstructure prediction in eutectoid steel. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50(5):2241-2248.
 6. Huiping L., Guoqun Z., Shanting N., Chuanzhen H. FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;452-453:705-714.
 7. Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Gulina A.E. et al. Simulation of the cooling process during hardening of steel plates on plate mill 5000. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(2):33-37. (In Russ.)
 8. Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulina A.E., Emaleeva D.G., Adishchev P.G. Analysis of simulated plate cooling schedules. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(4):102-109. (In Russ.)
 9. Alekseev D.Yu., Gulina A.E., Emaleeva D.G. et al. Development of a finite element model for calculating the thermal field of coils in the thermomechanical process. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2022;(5):55-60. (In Russ.)
 10. Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. Fundamental of momentum, heat and mass transfer. 5th Edition. New York: J. Willey & Sons Inc., 2007, 729 p.

References

1. Podkustov V.P., Alekseev P.L. Determination of the temperature field of rolled products. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 1999;(9):40-42. (In Russ.)
2. Przygoda M., Redr M., Toman Z. et al. Determination of the temperature field of the feeding strip, when rolling on a four-high mill. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 1979;(5):56-60. (In Russ.)
3. Yanagimoto J., Liu J., Ito T. FE-based analysis for the microstructure evolution in hot bar rolling. *ISIJ International*. 2000;40(1):65-70.

Поступила 17.07.2023; принята к публикации 14.08.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 17/07/2023; revised 14/08/2023; published 25/12/2023

Алексеев Даниил Юрьевич – инженер инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: d.u.alekseev@mail.ru.

Емалеева Динара Гумаровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

Кузнецова Алла Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Гулин Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: a.gulin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Адищев Павел Геннадьевич – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: adishev2015@yandex.ru.

Тетюшин Кирилл Павлович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Daniil Yu. Alekseev – Engineer of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: d.u.alekseev@mail.ru.

Dinara G. Emaleeva – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

Alla S. Kuznetsova – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

Aleksandr E. Gulin – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Engineering Center of the Research and Innovation Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: a.gulin@magtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Pavel G. Adishchev – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: adishev2015@yandex.ru.

Kirill P. Tetyushin – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.