

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

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

УДК 621.77.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109



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.

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

Аннотация. Постановка задачи. Плоскостность толстолистового проката – один из важнейших показателей качества готовой продукции. При этом определяющую роль в обеспечении регламентируемых характеристик проката играет процесс охлаждения листа в ролико-закалочной машине. Повышение плоскостности термообработанного проката возможно за счет управления условиями теплообмена в процессе охлаждения и снижения градиента внутренних напряжений в металле. В связи с этим является актуальным анализ влияния следующих параметров процесса закалки на особенности теплообмена и уровень напряжений в металле: температура нагрева металла под закалку, температура охлаждающей воды, схема охлаждения, скорость перемещения и толщина проката. **Цель работы.** Исследование влияния схемы охлаждения на уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки. **Используемые методы.** Для достижения цели работы создана имитационная модель изменения теплового состояния металла в процессе охлаждения в ролико-закалочной машине стана 5000. В качестве метода исследования использовано конечно-элементное моделирование в DEFORM-3D. В разработанной модели учитывалось изменение температуры металла за счет охлаждения на воздухе (теплоотдача излучением и конвекцией) при транспортировке проката от нагревательной печи до первого коллектора, а также в промежутке между коллекторами и секциями. Кроме того, учитывалось, что в процессе охлаждения формируется три зоны контакта воды с металлом, характеризующиеся разными условиями теплоотдачи: область соударения потока воды с поверхностью листа, область малой интенсивности водяного потока, а также область пленочного кипения. Моделирование выполнено для четырех вариантов охлаждения, отличающихся общим расходом воды, а также распределением расхода воды по каждой из пяти зон ролико-закалочной машины. **Результаты.** Исследовано влияние схемы охлаждения на распределение температурных полей и уровень напряжений в металле, формируемых в поперечном сечении листового проката в процессе закалки.

Ключевые слова: листовой прокат, термическая обработка, закалка, конечно-элементное компьютерное моделирование, модель охлаждения, плоскостность

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.).

© Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Адищев П.Г., 2022

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109>



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

ANALYSIS OF SIMULATED PLATE COOLING SCHEDULES

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaileeva D.G., Adishchev P.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Relevance. Plate flatness is one of the most important indicators of the quality of finished products. Yet a decisive role in ensuring the regulated characteristics of rolled products is attributed to plate cooling in a roller-quenching machine. An increase in flatness of heat-treated rolled products is possible by controlling the conditions of heat transfer during cooling and reducing the gradient of internal stresses in steel. In this regard, it is relevant to analyze the effect of the following quenching process parameters on the features of heat transfer and stresses in steel: temperature of heating steel for quenching, cooling water temperature, the cooling schedule, traveling speed and plate thickness. **Objective.** The aim of the research is to study the influence of cooling schedules on stresses formed in plates during the quenching process. **Methods Applied.** To achieve the aim of the research, a simulation model was created to show changes in the thermal state of steel during cooling in the roller-quenching machine of mill 5000. A research method was finite element modeling in DEFORM-3D. The developed model factors into changes in steel temperature due to air cooling (heat transfer by radiation and convection), when plates travel from the heating furnace to the first header and between headers and sections. In addition, it factors into three water-steel contact zones, which are characterized by different heat transfer conditions: the impact area of a water flow on the plate surface, the area of a low water flow rate, and the area of film boiling. The simulation was performed for four cooling options, which differ in the total water consumption as well as the distribution of water consumption for each of the five zones of the roller-quenching machine. **Results.** The influence of the cooling schedules on the distribution of temperature fields and stresses in steel formed in the cross section of plates during quenching was studied.

Keywords: plates, heat treatment, quenching, finite element modeling, cooling model, flatness

The study was carried out 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 developing high-tech production facilities and implemented with a higher educational institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).

For citation

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaileeva 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, vol. 20, no. 4, pp. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-102-109>

Введение

Плоскость толстолистового проката – один из важнейших показателей качества готовой продукции. При этом определяющую роль в обеспечении регламентируемых характеристик проката играет процесс охлаждения листа в ролико-закалочной машине (РЗМ). Закалка металла в РЗМ предусматривает охлаждение листов при его непрерывном перемещении между двумя рядами роликов (верхними и нижними), установленных с зазором. В условиях толстолистового стана 5000 закалочная машина поделена на 5 раздельно управляемых зон и включает 2 участка:

- участок интенсивного охлаждения (зоны высокого давления № 1-2);
- участок малоинтенсивного охлаждения (зоны низкого давления № 3-5).

Повышение плоскости термообработанного проката возможно за счет управления условиями теплообмена в процессе охлаждения и снижения градиента внутренних напряжений в металле. В качестве основных параметров процесса закалки, влияющих на особенности тепло-

обмена и уровень напряжений в металле, могут выступать схема охлаждения, температура нагрева металла под закалку, температура охлаждающей воды, скорость перемещения металла через закалочную машину, толщина проката.

Таким образом, целью работы является исследование влияния схемы охлаждения (общего расхода воды и распределения расхода воды по зонам) на уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки.

Теория, материалы и методы исследования

Для достижения цели работы создана имитационная модель изменения теплового состояния металла в процессе охлаждения в РЗМ стана 5000 ПАО «ММК». В качестве метода исследования использовано конечно-элементное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D [1-7].

В настоящее время существует ряд работ, посвященных анализу особенностей теплообмена и расчету параметров охлаждения на границе «средалист» [8-13]. В разработанной модели учитывалось изменение температуры металла за счет охлаждения на воздухе (теплоотдача излучением и конвек-

цией) при транспортировке проката от нагревательной печи до первого коллектора, а также в промежутке между коллекторами и секциями. Кроме того, учитывалось, что при падении водяного потока на поверхность движущегося листа формируется три области контакта воды с охлаждаемым металлом, характеризующиеся разными условиями и коэффициентами теплоотдачи α_{yO} :

1. Область соударения потока воды с поверхностью листа, которая характеризуется сравнительно плотным контактом охлаждающей воды с металлом, турбулентным течением охлаждающего потока и высокими коэффициентами теплоотдачи (до $\approx 390 \text{ кВт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$).

2. Область малой интенсивности водяного потока, характеризующаяся сниженным по сравнению с первой областью коэффициентом теплоотдачи.

3. Область пленочного кипения, характеризующаяся ламинарным течением охлаждающего потока. В данной области наблюдается образование парового слоя, отделяющего поверхность металла от расположенного выше слоя воды. Это приводит к значительному понижению коэффициента теплоотдачи.

Рассмотренные выше коэффициенты теплоотдачи α_{yO} [13, 14] рассчитывались по формуле

$$\alpha_{yO} = k \cdot d_c^{0,719} \cdot \lambda_B \times \left[v_B \cdot (1 + 0,0337 t_B) + 0,000221 t_B^2 \right]^{1,719} \times \left(\frac{100 - t_B}{t_{Me} + 273} \right)^{0,964},$$

где k – эмпирический параметр оборудования; λ_B – коэффициент теплопроводности воды, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; v_B – скорость течения жидкости, $\text{м}/\text{с}$;

Таблица 1. Расходы воды по зонам ролико-закалочной машины
Table 1. Water consumption by zones of the roller-quenching machine

Номер варианта	Положение коллектора	Расход воды по зонам, $\text{м}^3/\text{ч}$					Общий расход, $\text{м}^3/\text{ч}$
		1	2	3	4	5	
1	Верх	520	845	0	0	0	3465
	Низ	800	1300	0	0	0	
2	Верх	200	340	285	275	285	3525
	Низ	320	520	440	420	440	
3	Верх	120	200	275	355	430	3500
	Низ	180	300	425	545	670	
4	Верх	700	1200	750	1150	1000	10200
	Низ	800	1300	1150	1150	1000	

d_c – диаметр проходного сечения сопла, м ; t_B – температура воды; t_{Me} – температура металла.

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи роликам рольганга ничтожно мал в сравнении с коэффициентом теплоотдачи воде. В связи с этим в работе принято допущение, в соответствии с которым тепловые потери металла, обусловленные взаимодействием проката с роликами, не учитываются и принимаются равными нулю.

Для расчетов был принят «элементарный объем» металла, расположенный на продольной оси листа. Толщина референтного образца составляла 10 мм, как наиболее «проблемного» профиля. Количество элементов тетраэдralьной сетки: 8000. С целью демонстрации особенностей и возможностей программы в качестве исследуемого материала выбрана микролегированная сталь (microalloyed steel) из стандартной библиотеки материалов DEFORM-3D. Коэффициент Пуассона: 0,3. Тип моделируемой среды: упругопластическая. Шаг расчета: 5°C. Температура нагрева металла под закалку: 860°C. Температура окружающей среды приравнивалась к температуре охлаждающей воды и принималась равной 23°C. Скорость перемещения листа через РЗМ: 14 м/мин. Давление охлаждающей воды: 500-600 кПа.

Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование процесса охлаждения выполнено для четырех вариантов охлаждения, отличающихся общим расходом воды и распределением расхода воды по зонам. Исследуемые варианты схем охлаждения приведены в табл. 1.

Результаты исследования влияния схемы охлаждения на распределение температурных полей по сечению охлаждаемого металла представлены на рис. 1.

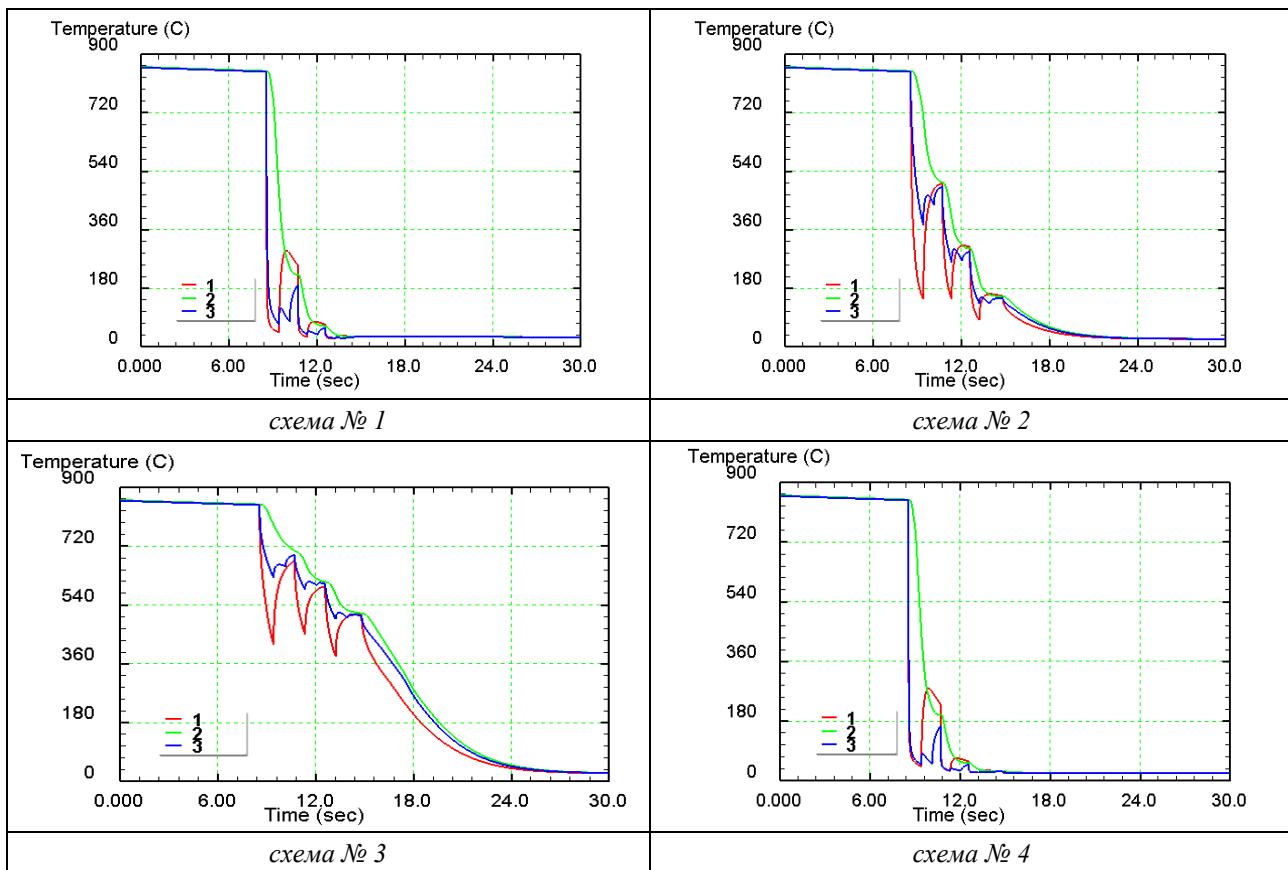


Рис. 1. Влияние схемы охлаждения на изменение температуры по сечению охлаждаемого металла:

1 – нижняя поверхность; 2 – центр; 3 – верхняя поверхность

Fig. 1. The influence of the cooling schedule on changes in temperature over the cross section of cooled steel:

1 is a bottom surface; 2 is a center; 3 is a top surface

Как следует из **рис. 1**, при охлаждении стали по варианту №1 (низ: максимальный расход воды; верх: расход воды составляет 65% от расхода снизу) наблюдается формирование незначительного градиента температур между верхней и нижней поверхностями листа: 25°C в 1-й зоне и 9°C в первом коллекторе 2-й зоны охлаждения. Верхняя поверхность листа является более горячей. Градиент температур между нижней поверхностью и центром металла составляет 437°C. Однако за счет того, что на верхней поверхности присутствует слой воды, температура нижней поверхности повышается и на входе во 2-ю зону охлаждения равна температуре центра (252°C). Закалка завершается в первом коллекторе 2-й зоны. Скорость охлаждения составляет 271°C/c.

При охлаждении стали по варианту №2 (наиболее равномерное распределение воды по зонам РЗМ) наблюдается значительный градиент температур между нижней и верхней поверхностью листа. Указанное явление наблюдается на протяжении всего процесса охлаждения. Наибольший градиент температур между верхней и нижней по-

верхностями листа создается в 1-й зоне охлаждения и составляет 235°C. Градиент температур между нижней поверхностью и центром составляет 565°C. В промежутке между коллекторами 1-й и 2-й зон охлаждения за счет горячих центральных слоев металла и малой интенсивности охлаждения поверхность проката разогревается. На входе в коллекторы 1-й и 2-й зон температура металла выравнивается по сечению. Градиент составляет около 10°C. Закалка завершается в начале 3-й зоны охлаждения. Скорость охлаждения составляет 97°C/c.

При охлаждении стали по варианту №3 (распределение расхода воды по нарастающей от 1-й к 5-й зоне охлаждения) прослеживаются закономерности, аналогичные закономерностям, наблюдаемым для схемы №2. Нижняя поверхность листа охлаждается быстрее верхней и до более низких температур. Наибольший градиент температур между верхней и нижней поверхностями создается в 1-й зоне охлаждения и составляет 201°C. Градиент температур между нижней поверхностью и центром составляет 363°C. На

входе в коллекторы 1-й и 2-й зон температура металла выравнивается по сечению: градиент составляет около $15-30^{\circ}\text{C}$. Закалка завершается в середине 3-й зоны охлаждения. Скорость охлаждения составляет $58^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Вариант охлаждения №4 (максимальный расход воды по всем зонам РЗМ) схож с вариантом №1. Однако за счет большего расхода воды в верхних коллекторах разность температур между верхней и нижней поверхностью листа составляет 5°C . В 1-й зоне охлаждения градиент температур между нижней поверхностью и центром листа составляет 405°C . На выходе во 2-ю зону охлаждения температура центральных слоев проката составляет 230°C . Закалка завершается в первом коллекторе 2-й зоны. Скорость охлаждения составляет $281^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

На **рис. 2** приведены результаты исследования влияния схемы охлаждения на распределение напряжений по сечению охлаждаемого металла. Как следует из **рис. 2**, при охлаждении стали по варианту №1 (низ: максимальный расход воды;

верх: расход воды составляет 65% от расхода снизу), а также по варианту №4 (максимальный расход воды по всем зонам РЗМ) наблюдается схожая картина. В центральных слоях проката возникают максимальные растягивающие напряжения, а на нижней поверхности – максимальные сжимающие. Наибольшие значения указанные напряжения достигают в 1-й зоне охлаждения: 180 МПа для растягивающих и -72 МПа для сжимающих напряжений. На выходе из первого коллектора 2-й зоны при охлаждении проката по варианту №1 в верхней половине листа наблюдается некоторое снижение напряжений (на 10 МПа по сравнению с вариантом №4). При прохождении через остальные коллекторы металл имеет температуру менее 100°C , и все возникшие напряжения сохраняются в виде остаточных. При охлаждении проката по варианту №1 максимальные значения составляют 86 МПа для растягивающих и -11 МПа для сжимающих остаточных напряжений. При охлаждении проката по варианту №4 указанные напряжения составляют 93 МПа и -9 МПа соответственно.

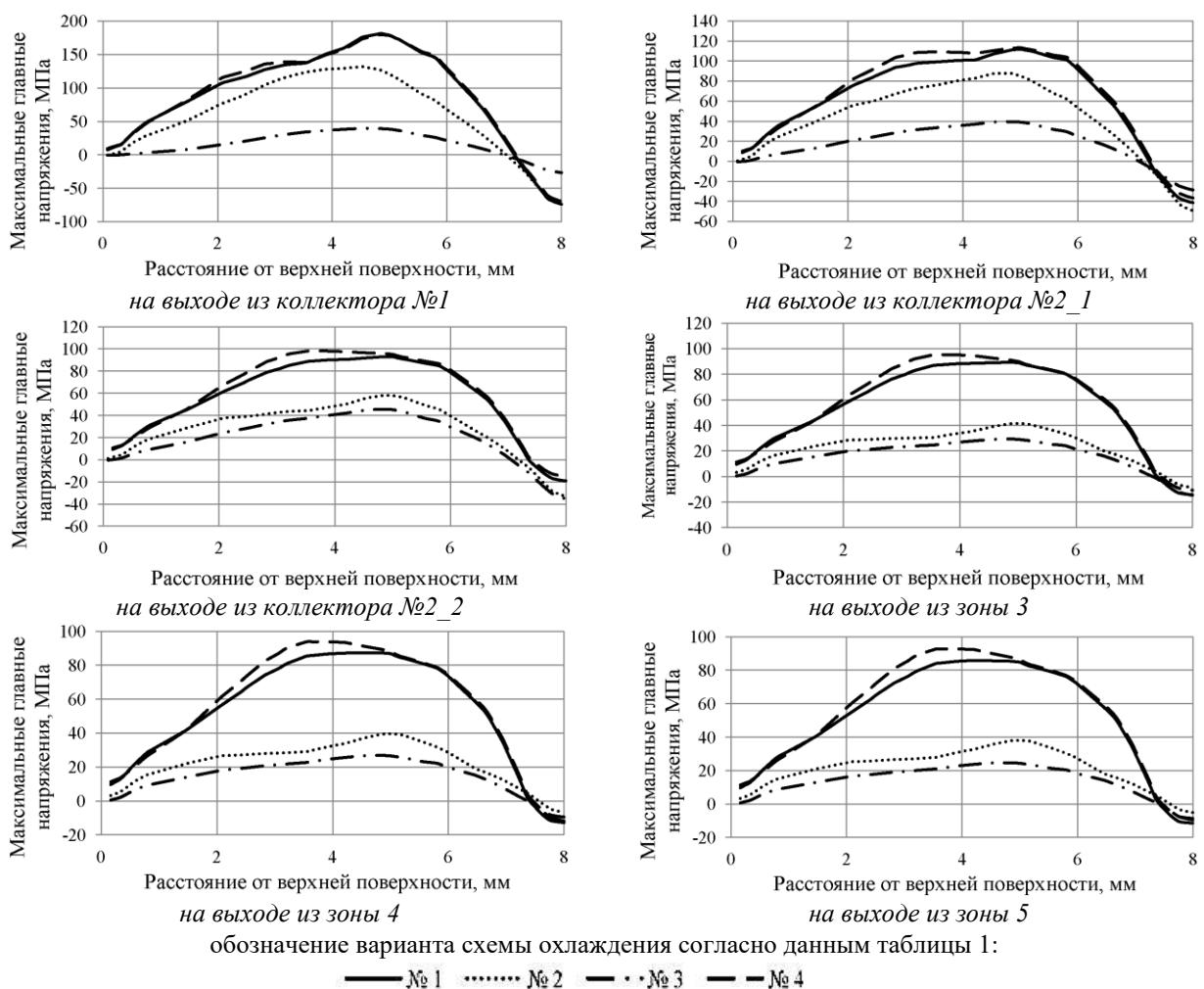


Рис. 2. Влияние схемы охлаждения на распределение напряжений по сечению охлаждаемого металла
Fig. 2. The influence of the cooling schedule on the distribution of stresses over the cross section of cooled steel

При охлаждении стали по варианту №2 (наиболее равномерное распределение воды по зонам РЗМ) максимальные растягивающие и сжимающие напряжения в центральных слоях и на поверхности проката также формируются в 1-й зоне охлаждения. Растягивающие напряжения составляют 131 МПа, а сжимающие напряжения достигают значения -73 МПа. На выходе из 3-й зоны охлаждения остаточные напряжения находятся на достаточно низком уровне и составляют 41 и -9 МПа для растягивающих и сжимающих напряжений соответственно.

Вариант охлаждения №3 (распределение расхода воды по нарастающей от 1-й к 5-й зоне охлаждения) отличается наименьшим уровнем напряжений, формируемых в металле. При охлаждении в 1-й и 2-й зонах в центральных слоях проката максимальные растягивающие напряжения находятся на уровне 40-45 МПа. На выходе из второго коллектора 2-й зоны охлаждения наблюдается некоторое увеличение сжимающих напряжений до -36 МПа. На выходе из РЗМ максимальные остаточные растягивающие и сжимающие напряжения составляют 24 и -10 МПа соответственно.

Следует отметить, что для всех вариантов охлаждения характерно то, что максимальные растягивающие напряжения формируются на расстоянии 3-3,5 мм от нижней поверхности проката. Это можно объяснить разностью в объемах подаваемой воды в верхних и нижних коллекторах.

Заключение

С использованием конечно-элементного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D выполнен анализ влияния схемы охлаждения на распределение температурных полей и уровень напряжений, формируемых в толстолистовом прокате в процессе закалки. Показано, что с точки зрения обеспечения условий для снижения градиента напряжений в охлаждаемом металле наиболее эффективным является применение варианта №3. Указанная схема охлаждения предусматривает общий расход воды в объеме 3500 м³/ч и характеризуется возрастанием расхода воды при движении металла от 1-й к 5-й зоне. Однако такое распределение обеспечивает низкую скорость охлаждения металла в процессе закалки: скорость охлаждения составляет 58°C/с. При необходимости реализации более высоких скоростей охлаждения может быть использован вариант №2, предусматривающий общий расход воды в объеме 3525 м³/ч и характеризующийся наиболее равномерным распределением воды по зонам РЗМ.

Полученные данные служат научным заделом при проектировании прогрессивных технологий изготовления многофункциональных материалов с требуемым комплексом эксплуатационных характеристик.

Список источников

1. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4 (40). С. 72-74.
2. Development of a finite element model for calculation of the thermal field of coil rolled products in the thermomechanical process / Alekseev, D.Yu., Gulin, A.E., Emaleeva, D.G., Kuznetsova, A.S. // Chernye metally, 2022(5), pp. 55-60.
3. Macro- and micromechanics of pearlitic-steel deformation in multistage wire production / Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Zaitseva M.V., Shiryaev O.P., Emaleeva D.G. // Steel in translation, 2018, 48(7), pp. 458-462.
4. Microstructure-based computer simulation of pearlitic steel wire drawing / Konstantinov D., Korchunov A., Emaleeva D., Chukin M., Shiryaev O. // Metal 2017 – 26th international conference on metallurgy and materials, Conference proceedings. 2017. Pp. 642-647.
5. Multiscale simulation of cold axisymmetric deformation processes / Konstantinov D., Korchunov A. // Key engineering materials. 2016. T. 685. Pp. 18-22.
6. Multiscale computer simulation of drawing with statistical representation of TRIP steel microstructure / Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Shiryaev O.P., Zaitseva M.V., kuznetsova a.s. // steel in translation, 2018, 48(4), Pp. 262-267.
7. Multiscale computer simulation of metastable steel rod drawing by using statistical representation of microstructure / Konstantinov D., Bzowski K., Korchunov A., Kuznetsova A., Shiryaev O. // Metal 2017 – 26th International conference on metallurgy and materials, conference proceedings, 2017, 2017-January, pp. 863-869.
8. Transient pool boiling heat transfer of oxidized and roughened Zircaloy-4 surfaces during water quenching / H. Yeom, H. Jo, G. Johnson et al. // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 120. Pp. 435-446.
9. Пат. 1044149 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи от поверхности конвективно охлаждаемых элементов / В.М. Сапожников, Г.П. Нагога; В.М. Сапожников, Г.П. Нагога; опубл. 10.12.2005.
10. Пат. 2001131534 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи твердых тел / В.А. Калинин, В.И. Курепин, Р.Ф. Новоселов; опубл. 20.12.1995.
11. Пат. 93042904 РФ. Способ определения коэффициента теплоотдачи / М.Н. Жорник; опубл. 27.06.2003.

12. Wells M.A., Militzer M., Prodanovic V. Heat transfer during run-out table cooling – effect of jet configuration // Proceeding of the MST'2007 Conference. 2007. Detroit. Pp. 221-231.
13. 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.
14. Panjkovic V. Model for prediction of strip temperature in hot strip steel mill // Appl. Therm. Eng. 2007. Vol. 27. Pp. 2404-2414.

References

1. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boyko A.B. Analysis of software packages for calculating the stress-strain state of composite materials in metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, vol. 40, no. 4, pp. 72-74. (In Russ.)
2. Alekseev D.Yu., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S. Development of a finite element model for calculation of the thermal field of coil rolled products in the thermomechanical process. Chernye Metally, 2022, 5, 55-60.
3. Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Zaitseva M.V., Shiryaev O.P., Emaleeva D.G. Macro- and micromechanics of pearlitic-steel deformation in multistage wire production. Steel in Translation, 2018, 48(7), 458-462.
4. Konstantinov D., Korchunov A., Emaleeva D., Chukin M., Shiryaev O. Microstructure-based computer simulation of pearlitic steel wire drawing. Metal 2017 – The 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference proceedings, 2017, pp. 642-647.
5. Konstantinov D., Korchunov A. Multiscale simulation of cold axisymmetric deformation processes. Key Engineering Materials, 2016, 685, 18-22.
6. Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Shiryaev O.P., Zaitseva M.V., Kuznetsova A.S. Multiscale computer simulation of drawing with statistical representation of TRIP steel microstructure. Steel in Translation, 2018, 48(4), 262-267.
7. Konstantinov D., Bzowski K., Korchunov A., Kuznetsova A., Shiryaev O. Multiscale computer simulation of metastable steel rod drawing by using statistical representation of microstructure. Metal 2017 – The 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference proceedings, 2017, January, pp. 863-869.
8. Yeom H., Jo H., Johnson G. et al. Transient pool boiling heat transfer of oxidized and roughened Zircaloy-4 surfaces during water quenching. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 2018, 120, 435-446.
9. Sapozhnikov V.M., Nagoga G.P. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi ot poverkhnosti konvektivno okhlazhdаемых элементов* [Method for determining the heat transfer coefficient from the surface of convectively cooled elements]. Patent RU, no. 1044149, 2005.
10. Kalinin V.A., Kurepin V.I., Novoselov R.F. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi tverdykh tel* [Method for determining the heat transfer coefficient of solids]. Patent RU, no. 2001131534, 1995.
11. Zhornik M.N. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teplootdachi* [Method for determining the heat transfer coefficient]. Patent RU, no. 93042904, 2003.
12. Wells M. A., Militzer M., Prodanovic V. Heat transfer during run-out table cooling – effect of jet configuration. MST 2007 Conference Proceeding, Detroit, pp. 221-231.
13. Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, 5th Edition. New York: J. Willey & Sons Inc. 2007, 729 p.
14. Panjkovic V. Model for prediction of strip temperature in hot strip steel mill. Appl. Therm. Eng., 27, 2007, 2404-2414.

Поступила 21.09.2022; принята к публикации 11.10.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 21/09/2022; revised 11/10/2022; published 22/12/2022

Полецков Павел Петрович – доктор технических наук, директор инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

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

Кузнецова Алла Сергеевна – кандидат технических наук, младший 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, младший научный сотрудник инжинирингового центра НИС, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.gulin@mgtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

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

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

Pavel P. Poletskov – DrSc (Eng.), Director of the Engineering Center of the Research and Development Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

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

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

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

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

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