

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.783
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н.

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. В процессе горячей прокатки важным фактором является тепловое состояние металла в линии стана. Разработка рациональных температурно-скоростных режимов нагрева слябов и производства полос требует проведения большого количества экспериментов, времени и затрат. В связи с чем для решения задач, направленных на получение готовых изделий с заданным набором свойств, необходим современный подход в проведении исследований. Одним из таких методов является совместное использование физического и математического моделирования. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса нагрева металла образцов, изготовленных из слябов текущего производства, с целью уточнения теплофизических коэффициентов стали 17ГС. Нагрев производили в муфельной печи ступенчато с выдержкой для достижения однородной температуры по объему образца, в результате были получены графики зависимости температуры по времени. На основании результатов физического моделирования в программном комплексе «Deform 3D» разработана математическая модель нагрева металла, повторяющая лабораторные исследования, с целью проверки адекватности модели. Используя полученные результаты исследований, проведено моделирование теплового состояния металла в линии стана горячей прокатки. Моделирование осуществляли в два этапа: первый – нагрев сляба перед горячей прокаткой, второй – горячая прокатка в черновой группе клетей. Сравнение поверхностных температур, полученных при моделировании, с показаниями пирометра за 5-й клетью показала разницу, не превышающую 15°C, что свидетельствует об адекватности модели. Разработанная математическая модель адекватна и может быть использована для моделирования теплового состояния металла при формировании неоднородности свойств на длинномерных изделиях.

Ключевые слова: лабораторные исследования, математическое моделирование, нагрев, прокатка, тепловое состояние, Deform 3D.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90232.

© Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н., 2021

Для цитирования

Исследование теплового состояния металла с использованием методов физического и математического моделирования / Левыкина А.Г., Горбунов К.С., Позднякова А.И., Соловьев В.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 102–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108>



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

STUDY ON A THERMAL STATE OF STEEL USING METHODS OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING

Levykina A.G., Gorbunov K.S., Pozdnyakova A.I., Solovyov V.N.

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia

Abstract. An important factor of a hot rolling process is a thermal state of steel in the mill line. The development of feasible temperature and speed schedules for heating slabs and producing strips requires a large number of experiments, time and costs. Therefore, to solve problems aimed at manufacturing finished products with a given set of properties, we need to apply a modern approach to carrying out research. One of these methods is a combined use of physical and mathematical modeling. This paper presents the results of experimental studies on a heating process of steel samples made from slabs of current production in order to specify thermophysical coefficients of steel grade 17GS. The samples were stepwise heated in a muffle furnace and soaked to achieve a uniform temperature over the sample volume; as a result, the authors obtained time-temperature curves. Physical modeling in DEFORM-3D was used to develop a mathematical model of heating steel, repeating laboratory research, in order to check adequacy of the model. Using the research results, the authors simulated the thermal state of steel in the hot rolling mill line. The simulation was carried out in two stages: the first one was heating a slab before hot rolling; the second one was hot rolling in roughing stands. The surface temperatures obtained during the simulation and compared with the readings of a pyrometer after the 5th stand showed a difference not exceeding 15°C, which indicated adequacy of the model. The developed mathematical model is adequate and can be used to simulate the thermal state of steel during the formation of non-uniform properties of long products.

Keywords: laboratory research, mathematic modeling, heating, rolling, thermal state, DEFORM-3D.

The reported study was funded by RFBR according to research project No. 20-38-90232.

For citation

Levykina A.G., Gorbunov K.S., Pozdnyakova A.I., Solovyov V.N. Study on a Thermal State of Steel Using Methods of Physical and Mathematical Modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 102–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-102-108>

Введение

Конечные свойства и структура проката определяются тепловым состоянием металла на всех этапах его производства. В процессе горячей прокатки на НШСГП важными факторами являются температурный режим нагрева слябов и прокатки полос [1, 2]. Нагрев слябов с контролем внутренних тепловых напряжений позволяет исключить образование дефектов. В свою очередь, изменяя температурный режим прокатки, можно оказывать влияние на формирование механических свойств проката [3–5].

Разработка рациональных температурно-скоростных режимов нагрева слябов и производства полос на станах горячей прокатки требует проведения большого количества экспериментов, времени и затрат [6, 7]. Существенно сократить эти затраты позволяет использование математических моделей. В настоящее время для моделирования процесса прокатки широко применяются различные программные пакеты, позволяющие прогнозировать технологию производства листа [8–10], начиная загрузкой металла в

методическую печь и заканчивая выпуском готовой продукции. Однако изучение конкретного технологического процесса, а зачастую конкретного материала требует дополнительных данных. В связи с чем приходится использовать сведения из различных источников либо использовать материалы, близкие по химическому составу, что может сказаться на точности разработанной модели.

Для решения задач, направленных на получение готовых изделий с заданным набором свойств, необходим современный подход в проведении исследований. Это особенно важно при прогнозировании формирования неоднородности металла на длинномерных изделиях. Одним из таких методов является совместное использование физического и математического моделирования.

Целью данной работы является разработка тепловой математической модели на основании результатов лабораторных экспериментов и исследования с ее помощью теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки.

Проведение исследований с помощью физического моделирования

Для экспериментального исследования процесса нагрева металла с целью уточнения теплофизических характеристик стали 17ГС, химический состав которой представлен в табл. 1, были отобраны темплеты и изготовлены из них образцы размером 50×70×70 мм. В образцах засверлены отверстия диаметром 5 мм для размещения термопар (рис. 1).

Таблица 1. Химический состав стали марки 17ГС, %
Table 1. The chemical composition of steel grade 17GS, wt %

C	Si	Mn	S	P	N	Al	Cr	Ni	Cu	N
0,18	0,17	1,35	0,005	0,007	0,005	0,054	0,02	0,01	0,02	0,005

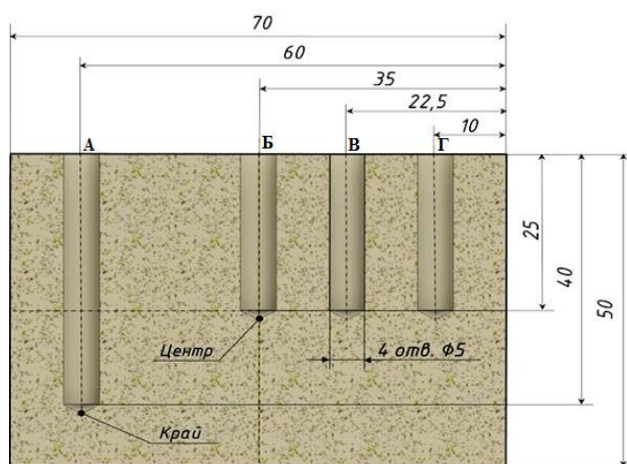


Рис.1. Схема расположения термопар в образце
Fig. 1. Location of thermoelements in the sample

Образцы нагревались в муфельной печи. Загрузочное окно печи в период нагрева и охлаждения закрывалось шамотным кирпичом, щели заделывались каолиновой ватой. Образец в печи размещали на керамическую подкладку, чтобы исключить контакт нижней термопары с подом печи.

Для измерения температуры металла по сечению образца и температуры в печи использовали термопреобразователи (далее – термопары), две из которых зачеканили в отверстия А и Б (см. рис. 1) для обеспечения контакта спая с металлом, а две другие термопары для измерения температуры печного пространства располагались сверху и снизу образца, не касаясь подины. Результаты изменения температуры в печи и в самом образце регистрировали с помощью 4-канального измерителя-регулятора ELHART ECD4-L, запись температур во время исследования проводилась с частотой 0,1 с.

Нагрев проводился ступенчато: первая ступень – 400°С, вторая – 900°С, третья – 1150°С. Образец помещали в печь при температуре 400°С. На каждой ступени нагрева проводилась выдержка, достижение однородной температуры между центром образца и его поверхностью определяли по показаниям средней и верхней термопар. После нагрева и выдержки при 1150°С образец охлаждался вместе с печью до комнатной температуры. Результаты экспериментального нагрева представлены на рис. 2.

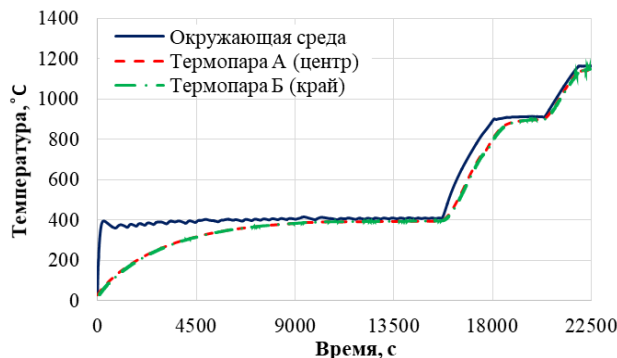


Рис. 2. Результаты экспериментального нагрева образца из стали 17ГС
Fig. 2. Experimental heating of the sample of 17GS steel

Проведение исследований с помощью математического моделирования

На основании результатов физического моделирования была разработана математическая модель в программном комплексе «Deform 3D», повторяющая нагрев металла в печи с целью проверки адекватности модели. Температура окружающей среды задавалась по показаниям нижней и верхней термопар, фиксирующих температуру в пространстве печи. Теплофизические коэффициенты для стали 17ГС были заданы на основании имеющихся в открытых источниках данных [11, 12]. Коэффициент теплоотдачи и степени черноты приняты 10 Вт/м²·К и 0,8 соответственно.

Сравнение лабораторных исследований и моделирования осуществлялось на основании показаний температур центральной термопары. Различие значений составило более 50°С, что нецелесообразно для моделирования процесса горячей прокатки. Для корректировки модели нагрева был проведён подбор коэффициента теплоотдачи и степени черноты. По результатам натуральных исследований коэффициент теплоотдачи составляет 49,5 Вт/м²·К и степени черноты – 0,79; расхождение температур не превышает 10°С, что свидетельствует об адекватности разработанной модели (рис. 3).

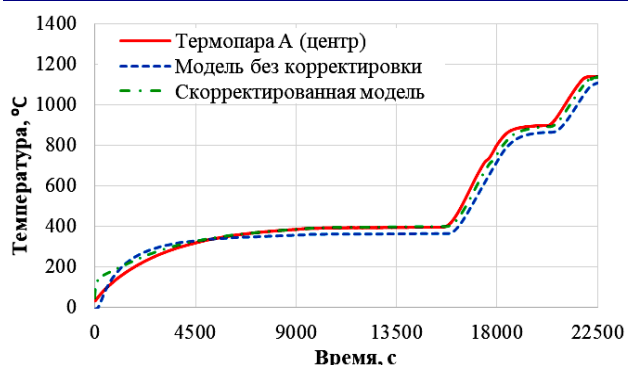


Рис. 3. Сравнение результатов физического и математического моделирования
Fig. 3. Comparison of the results of physical and mathematical modeling

Использование разработанной модели в решении практических задач

С использованием скорректированных данных, полученных в результате натурных исследований, проведено математическое моделирование теплового состояния металла в линии НШСГП для стали марки 17ГС. Моделирование производилось в два этапа: 1 – нагрев сляба в методической нагревательной печи; 2 – горячая прокатка в черновой группе клетей.

Моделирование нагрева осуществлялось в методической печи с шагающим балками [2] с переменным темпом нагрева. Средняя температура металла и время нахождения сляба в кон-

кретной зоне составляют: в зоне I – 960°C и 4440 с, в зоне II – 1230°C и 2460 с, в зоне III – 1320°C и 2220 с, в зоне IV – 1320°C и 1500 с и в зоне V – 1290°C и 1560 с соответственно. Общее время нагрева принято равным 12180 с (3 ч 22 мин). Температура посяда сляба в печь однородна и принята равной 38°C. Габаритные размеры сляба составляют 250×1090×10400 мм. Однако, учитывая геометрическую симметричность и однородность граничных условий, для уменьшения времени расчета моделировали ¼ часть исходной заготовки с размерами 250×545×5200 мм.

Результаты расчёта нагрева металла представлены на рис. 4. Расхождение между результатами моделирования и промышленными данными не превышает 15°C.

Математическое моделирование теплового состояния металла в линии стана горячей прокатки производили с помощью модуля «Shape rolling» и решателя «ALE rolling» программного комплекса «Deform 3D», которые позволяют рассматривать прокатку как установившийся процесс, не учитывая подстуживание концевых участков, уменьшая при этом время на расчет технологического процесса. Состав оборудования, принятый при моделировании, соответствует стану горячей прокатки 2000 ПАО «НЛМК» [13]. Расчет температурных параметров производили по режимам, представленным в табл. 2, с применением реверсивной прокатки в 1-й клетке черновой группы.

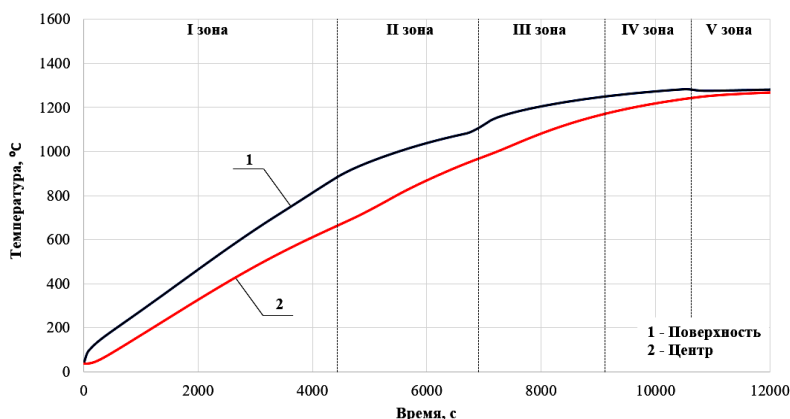


Рис. 4. Изменение температуры в контрольных точках сляба при нагреве в методической печи
Fig. 4. Temperature change in the reference points of the slab during heating in a continuous slab heating furnace

Таблица 2. Параметры прокатки для черновой группы клетей для стали 17ГС
Table 2. The parameters of rolling in the roughing stands for steel grade 17GS

Номер клетки	1	1	1	2	3	4	5
h_1 , мм	215,0	179,2	147,1	117,0	85,3	60,2	44,7
ϵ , %	14,00	16,65	17,91	20,46	27,09	29,43	25,75
v , м/с	1,4	1,6	1,4	1,5	2,0	2,5	3,2
$T_{вал}$, °C	90	90	90	90	85	85	80
$D_{вал}$, мм	1400	1400	1400	1200	1200	1200	1200

Алгоритм моделирования процесса горячей прокатки в линии стана принят на основе разработанной модели, представленной в работе [14]. Толщина сляба на входе в 1-ю клеть составляет 250 мм. Так как в процессе моделирования не учитывали распределение температурного поля по длине исследуемого объекта, габаритные размеры исследуемого сляба были уменьшены и составляют 125×400×600 мм. Для моделирования процесса прокатки использовали кривые зависимости напряжения течения металла от истинной деформации, полученные при лабораторных испытаниях на плоскодеформированное сжатие на установке Gleeble 3800 в Ченстоховском политехническом университете в Польше для стали 17ГС [15].

Результаты расчета представлены графически на рис. 5. Сравнение результатов моделирования с промышленными данными по пирометру за 5-й клетью черновой группы показало расхождение температур, не превышающих 15°C, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования по нагреву металлического образца из стали 17ГС в муфельной печи, по результатам которых получены графики температур в контрольных точках образца.

Разработана математическая модель, повторяющая нагрев металла в печи с целью проверки адекватности модели. Произведено уточнение теплофизических параметров для стали 17ГС. Сравнение результатов лабораторных исследований и модели осуществлялось на основании показаний температур в центральной части об-

разца, расхождение не превышает 15°C.

На основании результатов физического и математического моделирования проведено исследование теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Моделирование производилось в два этапа: 1 – нагрев сляба в методической нагревательной печи; 2 – горячая прокатка в черновой группе клетей. Сравнение результатов моделирования с промышленными данными по показаниям термопар показало расхождение температур не более 15°C, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Разработанная математическая модель адекватна и может быть использована для моделирования теплового состояния металла при формировании неоднородности свойств на длинномерных изделиях.

Список литературы

1. Мухин Ю.А., Соловьев В.Н, Бобков Е.Б. Влияние деформационно-скоростного режима горячей прокатки в чистовой группе широкополосных станов на структуру стали марки Ст3 // Черные металлы. 2018. № 11 (1043). С. 12–15.
2. Дождиков В.И., Ганул А.О., Мордовкин Д.С. Оптимизация работы энерготехнологического комплекса нагрева металла перед прокаткой // Сталь. 2018. №2. С. 69–71.
3. Особенности температурного поля стальных полос при горячей прокатке / Мухин Ю.А., Бельский С.М., Чупров В.Б., Бахаев К.В., Стоякин А.О. // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. №6. С. 417–421.
4. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические предложения). Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. 493 с.

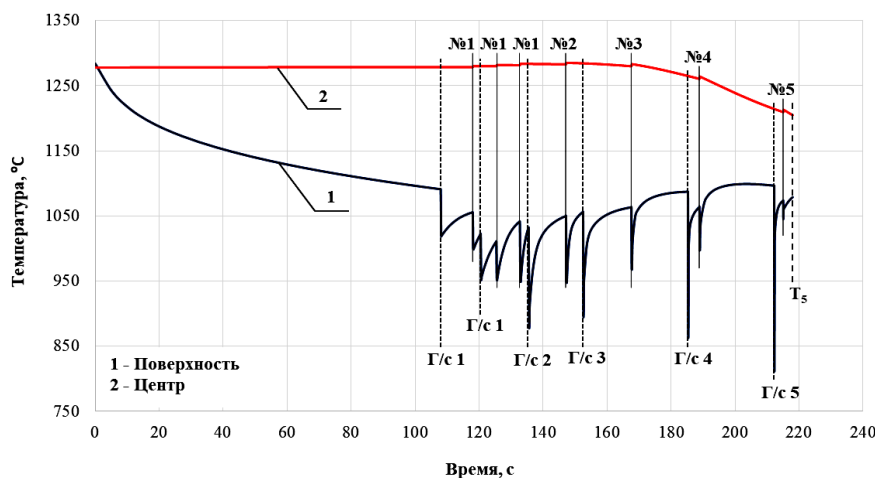


Рис. 5. График изменения температур в контрольных точках сляба при прокатке в черновой группе клетей
 Fig. 5. Curve of temperature changes in the reference points of the slab during rolling in the roughing stands

5. Соловьев В.Н., Бобков Е.Б. Температурный режим, повышающий производительность широкополосного стана горячей прокатки при производстве малоуглеродистых сталей // Черные металлы. 2020. № 8. С. 15–19.
6. Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Саранча С.Ю. К вопросу моделирования процессов ОМД: методы оптимизации программного обеспечения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 75-й международной научно-технической конференции. Том 1. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. С. 76–79.
7. Кальченко А.А., Пашченко К.Г. Моделирование процессов ОМД с использованием современных программных продуктов: учебное пособие. Магнитогорск, 2017.
8. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Численное моделирование процесса деформации сляба с разной величиной обжатия в вертикальных валках черновой группы стана 2000 // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. 77(6). С. 675–681.
9. Поляков А.В., Шатшу Нетштутзим Р., Мазур И.П. Влияние технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 1. Технологические параметры // Черные металлы. 2020. № 8. С. 20–24.
10. Поляков А.В., Шатшу Нетштутзим Р., Мазур И.П. Влияние технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 2. Критическая точка // Черные металлы. 2020. № 9. С. 45–48.
11. Klimes L., Stetina J., Parilak L., Bucek P. Study of thermal behavior of continuously cast billets // Engineering MECHANICS, vol. 20, 2013, no. 3/4, pp. 237–246 (in English).
12. Markowski J., Knapinski M., Koczurkiewicz B., Fraczek T. The physical modelling of the process of normalizing rolling of S355J2G3 a steel plates // The Metallurgist, 74 (6) (2007), pp. 296–300 (in English).
13. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. В 2-х кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
14. Levykina A.G., Chabonenko A.A., Shkatov V.V., Mazur I.P. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in «Deform 3D» // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1134 (1). P.1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012034 (in English).
15. Mazur I., Levykina A., Laber K. The mathematical model of the thermal state of the metal in the hot rolling mill. / XIX International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» // A collective monograph edited by Marcin Knapinski. Czestochowa, Poland, EU. 2018. Series: Monografie № 78, pp.168–173. (in English).

References

1. Mukhin Yu.A., Solovyov V.N., Bobkov E.B. Effect of a deformation and speed schedule of hot rolling in roughing stands of hot strip mills on a structure of steel grade St3. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2018, no. 11 (1043), pp. 12–15. (In Russ.)
2. Dozhdikov V.I., Ganul A.O., Mordovkin D.S. Optimizing an operation of power and process facilities for heating steel before rolling. *Stal* [Steel], 2018, no. 2, pp. 69–71. (In Russ.)
3. Mukhin Yu.A., Belskiy S.M., Chuprov V.B., Bakhaev K.V., Stoyakin A.O. Features of a temperature field of steel strips during hot rolling. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Ferrous Metallurgy], 2015, vol. 58, no. 6, pp. 417–421. (In Russ.)
4. Mazur V.L., Nogovitsyn A.V. *Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoy prokatki (chislennyi analiz i tekhnicheskie predlozheniya)* [Theory and technology of thin sheet rolling (a numerical analysis and technical proposals)]. Dnepropetrovsk: RVA Dnipro-VAL, 2010, 493 p. (In Russ.)
5. Solovyov V.N., Bobkov E.B. A temperature schedule increasing performance of a hot strip mill, when producing low-carbon steels. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 15–19. (In Russ.)
6. Levandovskiy S.A., Kinzin D.I., Sarancha S.Yu. On the issue of simulating metal forming processes: methods for optimizing software. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 75-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of modern science, equipment and education: proceedings of the 75th International Scientific and Technical Conference]. Volume 1. Magnitogorsk: NMSTU, 2017, pp. 76–79. (In Russ.)
7. Kalchenko A.A., Pashchenko K.G. *Modelirovanie protsessov OMD s ispolzovaniem sovremennykh programmnykh produktov: uchebnoe posobie* [Simulating metal forming processes using modern software: a tutorial], Magnitogorsk, 2017. (In Russ.)
8. Bolobanova N.L., Garber E.A. Numerical modeling of a slab deformation process at various reduction values in vertical rolls of roughing stands on rolling mill 2000. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2021, no. 77(6), pp. 675–681. (In Russ.)
9. Polyakov A.V., Shatshu Netshutzim R., Mazur I.P. Effect of process parameters of rolling in universal stands on shifting steel from edges to a longitudinal axis of workpieces. Report 1. Process parameters. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 20–24. (In Russ.)
10. Polyakov A.V., Shatshu Netshutzim R., Mazur I.P. Effect of process parameters of rolling in universal stands on shifting steel from edges to a longitudinal axis of workpieces. Report 2. Critical point. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 9, pp. 45–48. (In Russ.)

11. Klimes L., Stetina J., Parilak L., Bucek P. Study of thermal behavior of continuously cast billets. *Engineering Mechanics*, vol. 20, 2013, no. 3/4, pp. 237–246.
12. Markowski J., Knapinski M., Koczurkiewicz B., Fraczek T. The physical modelling of the process of normalizing rolling of S355J2G3 steel plates. *The Metallurgist*, 74 (6), 2007, pp. 296–300.
13. Kononov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. V dvukh knigakh. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos* [Reference book for rolling mill operators. In two books. Book 1. Hot rolled sheets and strips.]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 640 p. (In Russ.)
14. Levykina A.G., Chabonenko A.A., Shkatov V.V., Mazur I.P. The study of the thermal state of the metal in the production of the hot rolled strips in Deform 3D. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, no. 1134 (1), pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012034
15. Mazur I., Levykina A., Laber K. The mathematical model of the thermal state of the metal in the hot rolling mill. The 19th International Scientific Conference “New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics”. A collective monograph edited by Marcin Knapinski. Czestochowa, Poland, EU. 2018. Series: Monografie, no. 78, pp. 168–173.

Поступила 06.08.2021; принята к публикации 27.08.2021; опубликована 27.09.2021
Submitted 06/08/2021; revised 27/08/2021; published 27/09/2021

Левыкина Анна Геннадьевна – аспирант,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: levykina_ag@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0003-4143-1475

Горбунов Кирилл Сергеевич – аспирант,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

Позднякова Анна Ивановна – аспирант,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: mashina_ann@mail.ru. ORCID 0000-0001-7186-0241

Соловьев Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: solovyovvn@mail.ru. ORCID 0000-0003-1453-2422

Anna G. Levykina – Postgraduate Student,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: levykina_ag@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0003-4143-1475

Kirill S. Gorbunov – Postgraduate Student,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

Anna I. Pozdnyakova – Postgraduate Student,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: mashina_ann@mail.ru. ORCID 0000-0001-7186-0241

Vladimir N. Solovyov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: solovyovvn@mail.ru. ORCID 0000-0003-1453-2422