

Краткое сообщение

УДК 621.92

DOI 10.57070/2307-4497-2024-1(47)-81-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПА ВЫДАЧИ СЛЯБОВ И ЗАГОТОВОК НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И УГАР МЕТАЛЛА ПРИ НАГРЕВЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

© 2024 г. О. В. Кузнецова, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева, Е. М. Запольская

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В работе проведен анализ факторов, влияющих на неравномерность нагрева металла в методических печах. Особое внимание уделено исследованию влияния неравномерности темпа выдачи стальных слабов и заготовок из методических нагревательных печей на их тепловое состояние и потери с угаром. В качестве инструмента для исследований использована разработанная ранее детерминированная математическая модель, позволяющая определять динамику теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах. Для решения поставленной задачи модель модернизирована, ее функционал расширен с целью учета неравномерности перемещения нагреваемого металла в печи. Установлено, что при относительно не высоком влиянии неравномерности темпа выдачи на конечное тепловое состояние слабов угар может меняться в 1,5 раза, что обусловлено влиянием температурно-временного фактора.

Ключевые слова: методическая печь, слэбы, нагрев металла, температурно-временные факторы

Для цитирования: Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М. Исследование влияния темпа выдачи слэбов и заготовок на неравномерность теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):81–85. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-81-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-81-85)

Short report

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE RATE OF ISSUANCE OF SLABS AND BLANKS ON THE UNEVENNESS OF THE THERMAL STATE AND METAL CARBON MONOXIDE DURING HEATING IN METHODOICAL FURNACES

© 2024 O. V. Kuznetsova, M. V. Temlyantsev, E. N. Temlyantseva, E. M. Zapol'skaya

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The paper analyzes the factors influencing the uneven heating of metal in methodical furnaces. Special attention is paid to the study of the influence of the uneven rate of delivery of steel slabs and blanks from methodical heating furnaces on their thermal condition and losses with carbon monoxide. A previously developed deterministic mathematical model was used as a research tool to determine the dynamics of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces. To solve this problem, the model has been modernized, its functionality has been expanded in order to take into account the uneven movement of the heated metal in the furnace. It was found that with a relatively low effect of the uneven rate of discharge on the final thermal state of the slabs, carbon monoxide can change by 1.5 times, due to the influence of the temperature-time factor.

Keywords: methodical furnace, slabs, metal heating, temperature and time factors

For citation: Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M. Investigation of the effect of the rate of issuance of slabs and blanks on the unevenness of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):81–85. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-81-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-81-85)

Для нагрева непрерывнолитых заготовок, слабов и блюмов перед прокаткой наиболее широкое распространение получили методические печи различных конструкций [1; 2]. Одним из наиболее важных показателей качества нагрева металла является равномерность нагрева, которая характеризуется разностью температур (неравномерностью температурного поля) по сечению и по периметру непрерывнолитых заготовок блюмов или слабов [3]. Часто неравномерность характеризуют перепадом температур по толщине, длине и периметру.

В качестве основных первопричин неравномерности нагрева можно выделить основные факторы, связанные с:

- нагреваемым металлом (теплофизические свойства стали и влияние на них температуры, геометрические размеры и форма блюмов или слабов, в первую очередь углов (радиус закругления, наличие острых углов и т.п.));
- системой теплогенерации (равномерность интенсивности внешнего теплообмена, которая обусловлена работой топливосжигающих устройств, применяемым топливом, гидравлическим режимом работы печи) [4];
- конструкцией футеровки и геометрией рабочего пространства печи;
- системой транспортирования металла через печь (толкательного типа, шагающий под, шагающие балки) и шагом раскладки заготовок [5; 6];
- технологией производства, в частности необходимым темпом выдачи металла из печи.

Последний фактор заслуживает отдельного внимания. Поскольку традиционно для осу-

ществления инженерных расчетов и математического моделирования считают, что металл в методической печи перемещается равномерно, печь работает с постоянной производительностью, а время нагрева заготовок соответствующего сечения и марки стали одинаково [3; 7 – 10]. В условиях реального производства выдача металла из печи синхронизирована с работой прокатного стана. При этом необходимо учитывать, что в методических печах перемещение металла осуществляется дискретно толкателем, имеющим определенный цикл толкания, или механизмом шагающих балок или пода, который характеризуется определенным циклом шагания. Для реальных производственных условий характерны остановки стана, которые сопровождаются остановками транспортирования металла через печь.

В рамках настоящей работы проведена модернизация математической модели [3; 11; 12] на предмет учета неравномерности перемещения металла в методической печи. Для примера демонстрации работы модернизированной математической модели использован вариант нагрева [13; 14] слабов толщиной 0,25 м из стали марки ст2пс в методической печи длиной 50,4 м с шагающими балками одного из металлургических предприятий России. Температура погрузки металла 20 °С; конечная температура нагрева 1200 °С.

Темп неравномерного перемещения слабов в методической печи представлен на рис. 1. Общая продолжительность нагрева составляет 217 мин. При таком неравномерном перемещении время нахождения металла в различных

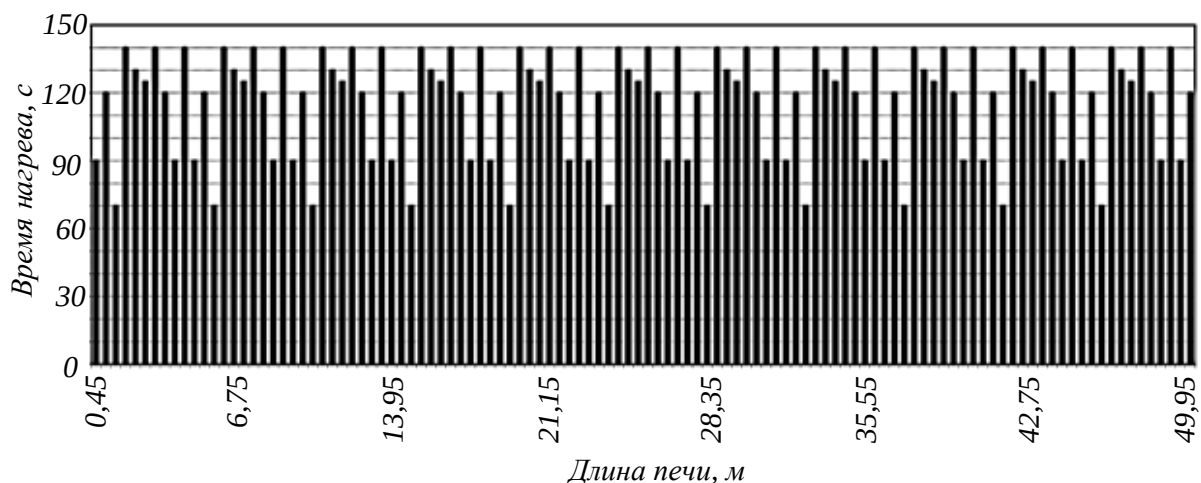


Рис. 1. Графики неравномерного темпа перемещения слабов в методической печи
Fig. 1. Graphs of the uneven rate of movement of slabs in a methodical furnace

участках печи меняется в 2 раза (от 70 до 140 с). При аналогичном нагреве, но с равномерным перемещением металла по печи, время нахождения слэбов на различных участках одинаково и составляет 116,25 с.

Из анализа результатов математического моделирования следует, что при исследуемых параметрах нагрева и одинаковой суммарной продолжительности нахождения металла в печи температуры нижней, верхней поверхностей и центра слэбов при равномерном и неравномерном темпе перемещения отличаются максимум на $-11 \div +20$ °С. Конечное тепловое состояние слэбов на выдаче из печи фактически одинаковое, различие температур составляет не более 1 – 2 °С.

Для оценки влияния неравномерности темпа перемещения на угар металла в печи [15; 16] проанализировали два дополнительных режима нагрева (рис. 2). Угар рассчитывали по соотношениям, представленным в работах [11; 17]. Режим 2 характеризуется тем, что от посада до середины печи слэбы перемещаются циклами продолжительностью 70 с, а далее до выдачи через 162,5 с. Для режима 3 от посада до середины печи слэбы перемещаются циклами через 162,5 с, а далее до выдачи через 70 с. По рассчитанному тепловому состоянию слэбов определили угар металла при нагреве. Для условий темпа перемещения соответствующему рис. 1 потери металла составили 0,173 г/см², для режимов 2 и 3 0,194 и 0,133 г/см². Более высокий угар для режима 2 обоснован тем, что при такой неравномерности темпа перемещения металла его поверхность находится большее время при более высокой температуре, чем при других сравниваемых режимах. Это подтверждается тем, что при режиме

2 поверхность слэбов достигает температуры в 800 °С (интенсификации угара) уже на 80 мин нагрева, а при режиме 3 только на 105 мин.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что неравномерность темпа выдачи металла из методических нагревательных печей, вызванная технологическими факторами, оказывает влияние на конечное состояние металла и экономичность нагрева, обусловленную потерями металла от угара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. *Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики)* / Под ред. А.Б. Усачева. Москва: Теплотехник. 2007:656.
2. Кривандин В.А., Егоров А.В. *Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии*. Москва: Металлургия. 1989:462.
3. Перетятыко В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. *Нагрев стальных слэбов*. Москва: Теплотехник. 2008:192.
4. Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008;6(1):80–85.
5. Кузнецова О.В., Коноз К.С., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование влияния неравномерности нагрева заготовок в методических печах с механизированным подом на угар металла. В кн.: *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции*

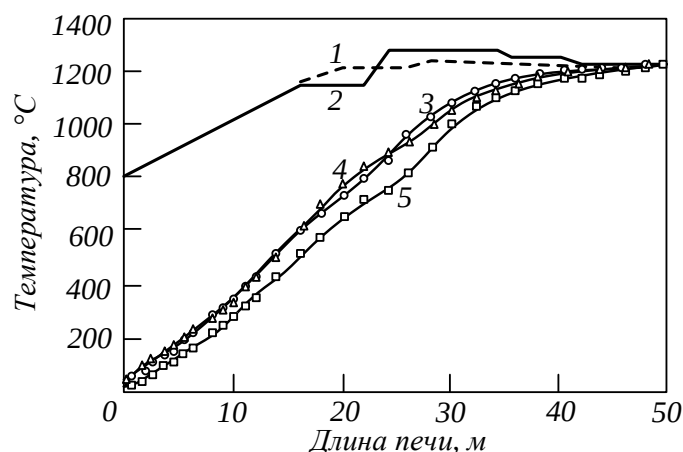


Рис. 2. Температурный режим нагрева слэбов в методической печи:

1 и 2 — температуры нижних и верхних камер печи; 3 – 5 — температура верхней, нижней поверхностей и центра слэбов (линии — равномерное перемещение, точки — неравномерное)

Fig. 2. The temperature regime of heating slabs in a methodical furnace:

1 and 2 — the temperatures of the lower and upper chambers of the furnace; 3 – 5 — the temperature of the upper, lower surfaces and the center of the slabs (lines — uniform movement, points — uneven)

- студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2017:62–66. EDN: ZSTQMT.
6. German M.L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2006;79(4):736–740. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-006-0159-1>
 7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва: Металлургия. 1990:239. EDN: VJQRUM.
 8. Соколов А.К. Совершенствование и оптимизация нагрева металла в газовых печах методом математического моделирования. Иваново: ИГЭУ. 2012:255. EDN: OWFPWM.
 9. Ревун М.П., Соколов А.К. Моделирование нагрева металла при автоматизированном проектировании и управлении. Запорожье: ЗГИА. 2000:351. EDN: GNXPYN.
 10. Li G.-J., Li X.-T., Chen H.-G. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;79:105–110. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.79.105>
 11. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. Москва: Теплотехник. 2006:200.
 12. Павлов В.В., Темлянцев М.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. Москва: Теплотехник. 2007:279. EDN: QMZWVN.
 13. Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Уманский А.А., Скопич Д.В., Фатянова Е.А. Исследование влияния неравномерности перемещения слэбов и заготовок в методических печах на тепловое состояние металла. *Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение*. 2018;21:100–108. EDN: YPWXUL.
 14. Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н. К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах. *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2018;40:49–53.
 15. Кузнецова О.В., Коноз К.С., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование влияния неравномерности нагрева заготовок в методических печах на процессы окалинообразования. В кн.: *Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы Инновационного конвента*. 2017. С. 403–406.
 16. Jang J.H., Lee D.E., Kim M.Y., Kim H.G. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53:4326–4332. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.05.061>
 17. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Темлянцев М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. Новосибирск: СО РАН. 2016:269. EDN: VWWFLN.

REFERENCES

1. Gusovskii V.L., Ladygichev M.G., Usachev A.B. *Modern heating and thermal furnaces (designs and technical characteristics)* / A.B. Usachev ed. Moscow: Teplotekhnika. 2007:656. (In Russ.).
2. Krivandin V.A., Egorov A.V. *Thermal operation and designs of furnaces of ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya. 1989:462. (In Russ.).
3. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev N.V., Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Heating of steel slabs*. Moscow: Teplotekhnika. 2008:192. (In Russ.).
4. Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008;6(1):80–85.
5. Kuznetsova O.V., Konoz K.S., Temlyantsev M.V., Temlyantsev N.V. Investigation of the effect of uneven heating of workpieces in methodical furnaces with mechanized hearth on metal carbon monoxide. In: *Heat engineering and Computer science in education, science and production. Collection of reports of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists (TIM'2017) with international participation*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina. 2017:62–66. EDN: ZSTQMT. (In Russ.).
6. German M.L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2006;79(4):736–740. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-006-0159-1>
7. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. Mathematical modeling of the thermal operation of industrial furnaces. Moscow: Metallurgiya. 1990:239. EDN: VJQRUM. (In Russ.).

8. Sokolov A.K. *Improvement and optimization of metal heating in gas furnaces by mathematical modeling*. Ivanovo: IGEU. 2012:255. EDN: OWFPWM. (In Russ.).
9. Revun M.P., Sokolov A.K. Modeling of metal heating in computer-aided design and management. Zaporozhye: ZGIA. 2000:351. EDN: GNXPYN. (In Russ.).
10. Li G.-J., Li X.-T., Chen H.-G. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;79:105–110. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.79.105>
11. Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Oxidation and decarbonization of steel in the processes of heating under pressure treatment*. Moscow: Teplotekhnika. 2006:200. (In Russ.).
12. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu. *Promising technologies of thermal and heat treatment in the production of rails*. Moscow: Teplotekhnika. 2007:279. EDN: QMZWVN. (In Russ.).
13. Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Umanskii A.A., Skopich D.V., Fat'yanova E.A. Investigation of the effect of uneven movement of slabs and workpieces in methodical furnaces on the thermal state of the metal. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 2018;21:100–108. EDN: YPWXUL. (In Russ.).
14. Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N. On the issue of taking into account the uneven movement of workpieces in the mathematical modeling of metal heating processes in methodical furnaces. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2018;40:49–53. (In Russ.).
15. Kuznetsova O.V., Konoz K.S., Temlyantsev M.V., Temlyantsev N.V. Investigation of the effect of uneven heating of workpieces in methodical furnaces on the processes of scale formation. In: *Kuzbass: education, science, innovation. Materials of the Innovation Convention*. 2017:403–406. (In Russ.).
16. Jang J.H., Lee D.E., Kim M.Y., Kim H.G. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53:4326–4332. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.05.061>
17. Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V. *Development and implementation of energy- and resource-saving technologies for metal forming*.

Novosibirsk: SO RAN. 2016:269. EDN: VWWFLN. (In Russ.).

Сведения об авторах

Ольга Владимировна Кузнецова, магистрант, Сибирский государственный индустриальный университет

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

SPIN-код: 9096-4256

Екатерина Михайловна Запольская, преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors

Olga V. Kuznetsova, undergraduate student, Siberian State Industrial University

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

ORCID:

SPIN-код: 9096-4256

Ekaterina M. Zapol'skaya, Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 26.02.2024

После доработки 04.03.2024

Принята к публикации 06.03.2024

Received 26.02.2024

Revised 04.03.2024

Accepted 06.03.2024