

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74:536

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С.¹, Михалев А.В.¹, Шевелев М.М.², Биалов Д.Х.¹¹Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия²ЗАО «Центр тепловизионной диагностики», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Поставлена и решена задача определения плотности теплового потока, подводимого к контактной поверхности бойка, по экспериментально замеренным параметрам совмещенного процесса получения стальных полос на опытной установке непрерывного литья и деформации. Определение плотности теплового потока по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов в объемной постановке с использованием пакета ANSYS. Приведены начальные и граничные условия для решения задачи. В качестве начальных условий для решения задачи нестационарной теплопроводности приняты начальная температура бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, геометрические размеры получаемой полосы и марка стали, скорость вытягивания полосы из кристаллизатора установки и время обжарки сляба бойками установки. В качестве граничных условий при решении задачи нестационарной теплопроводности использованы плотность теплового потока, который подводится к контактной поверхности бойка во время обжарки сляба, и эффективный коэффициент теплоотдачи, величина которого определена по экспериментальным данным. Средняя температура контактной поверхности бойка после окончания обжарки слябов определена путем замеров температуры бойков при экспериментальном исследовании совмещенного процесса на опытной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод». По этой температуре бойка путем численного моделирования теплового режима работы бойка установки непрерывного литья и деформации определена величина плотности теплового потока. Результаты расчета температурных полей даны в четырех сечениях бойка и приведены для характерных точек. Установлены закономерности распределения температуры как по толщине бойка, так и по толщине его приконтактного слоя при получении стальных листов на установке непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: плотность теплового потока, коэффициент теплоотдачи, установка непрерывного литья, боек, деформация, температура, конечный элемент.

Введение

Для расчета температурных полей бойков установки непрерывного литья и деформации необходимо при решении задачи нестационарной теплопроводности задать ряд параметров, определяющих тепловой режим работы бойков при получении стальных листов. Наиболее важные из них – плотность теплового потока от металла очага деформации при обжарке непрерывнолитого сляба и эффективный коэффициент теплоотдачи при охлаждении водой рабочей поверхности бойка во время холостого хода – можно определить лишь путем численного моделирования теплового режима работы бойка с

различными значениями параметров и сравнить эти результаты с экспериментальными данными.

Методика численного эксперимента

Целью численного эксперимента являлось определение плотности теплового потока, подводимого к рабочей поверхности бойка, по экспериментально замеренным параметрам процесса получения полосы толщиной 10 мм и шириной 240 мм из стали 09Г2С на опытной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод» [1,2] (рис. 1).

Во время эксперимента после выхода полосы из бойков опытной установки непрерывного литья и деформации проводились замеры температуры контактной поверхности бойков. В результате установлена средняя температура контактной поверхности бойков, равная 300°С.

© Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Биалов Д.Х., 2019



Рис. 1. Установка непрерывного литья и деформации:
1 – индукционная печь; 2 – электродвигатель постоянного тока;
3 – редуктор-синхронизатор; 4 – станина установки

Определение плотности теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности в объемной постановке методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [1–6].

Геометрия бойка для расчета и положение сечений приведены на **рис. 2**.

Время контакта бойков с полосой – 0,15 с. Время паузы (холостого хода) – 0,45 с.

Во время обжатия сляба к контактной (рабочей) поверхности бойка прикладывается гранич-

ное условие в виде плотности теплового потока, величину которого и надо определить. Во время паузы контактная поверхность бойка охлаждается водой с температурой 35°C. К ней прикладывается граничное условие в виде эффективного коэффициента теплоотдачи α_1 . Значение этого коэффициента определено на основании опытных данных и для расчета принято $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Таким образом, для данного значения эффективного коэффициента теплоотдачи следует определить плотность теплового потока.

Что касается граничных условий во время контакта и паузы для боковых поверхностей бой-

ка, верха и низа бойка, а также задней поверхности бойка, то поскольку они охлаждаются воздухом, к ним прикладываются граничные условия в виде эффективного коэффициента теплоотдачи – $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ с температурой окружающего воздуха (температурой цеха) – 60°C .

В качестве начальных условий для бойка задается начальная температура бойка – 20°C .

Геометрические размеры получаемой полосы: толщина 10 мм, ширина 240 мм, длина 1600 мм.

Скорость вытягивания полосы – 1 м/мин.

При длине полосы 1,6 м, скорости вытягивания 1 м/мин полное время процесса – 96 с. При этом число оборотов эксцентрикового вала равно 160.

Для расчета температурного поля бойка необходимо также задать теплофизические свойства материала бойка, из которого он изготовлен (сталь 40Х) [1].

Определение плотности теплового потока по экспериментально замеренной температуре бойков выполнено путем решения нестационарной задачи теплопроводности в объемной постановке методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [2–6].

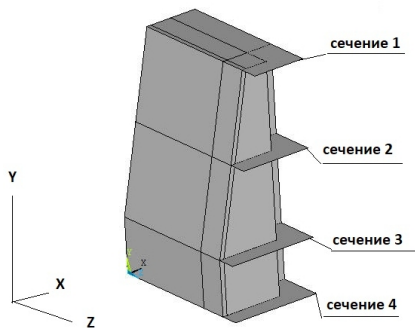


Рис. 2. Положение сечений, где приведены результаты расчета

Результаты расчета

Результаты расчета температур даны в четырех сечениях бойка, положение которых даны на рис. 2. При этом в каждом сечении температуры приведены для характерных линий P_1 , P_2 , P_3 и P_4 , которые для каждого сечения проходят по оси симметрии бойка и в направлении оси ОХ. Также результаты расчета приведены для характерных точек, положение которых дано на рис. 3.

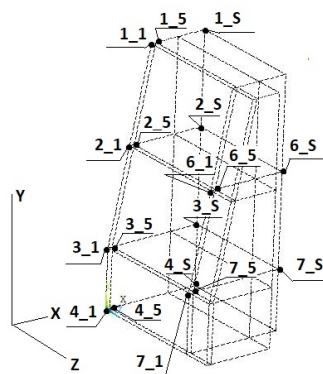


Рис. 3. Положение характерных точек

В результате многовариантных расчетов были определены значения плотности теплового потока для эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [7–11].

Так, для обеспечения через 96 с температуры в центре бойка на уровне 300°C при $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ значение плотности теплового потока получилось равным $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

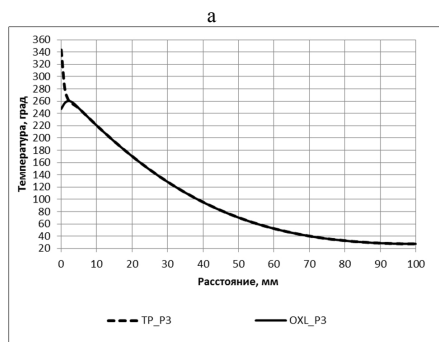
Результаты расчета температур с подобранными плотностями теплового потока для варианта охлаждения бойка при $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ даны на рис. 4.

В табл. 1 и 2 приведены значения температуры в характерных точках бойка через 96 с.

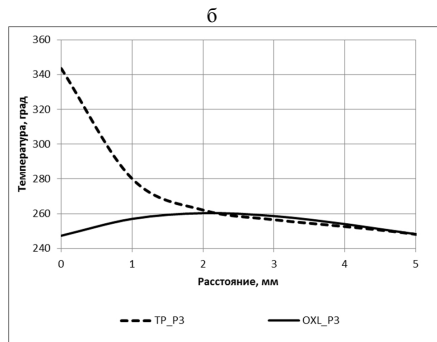
Табл. 1 характеризует распределение температуры бойка без каналов по толщине приконтактного слоя и длине бойка в конце обжатия слэба и в конце паузы (см. рис. 3). Так, точки 1_1 и 1_5 показывают распределение температуры по толщине приконтактного слоя в сечении 1 и по оси симметрии бойка, а точки 6_1 и 6_5 – в сечении 2 на боковой поверхности бойка. Табл. 2 характеризует распределение температуры по длине бойка на его задней поверхности, причем она изменяется в диапазоне $27\text{--}61^\circ\text{C}$.

Рис. 4 и табл. 1 и 2 характеризуют закономерности распределения температуры в бойке без каналов при обжатии слэба и на холостом ходу при тепловом потоке $4 \text{ МВт}/\text{м}^2$ и коэффициента теплоотдачи $2000 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Наибольшая температура, равная 343°C , возникает на контактной поверхности бойка при обжатии слэба в сечении 3 и далее по толщине приконтактного слоя она снижается до 248°C . Температура бойка в конце холостого хода равна 247°C (см. рис. 4, табл. 1).



По толщине бойка



От поверхности контакта вглубь на 5 мм

Рис. 4. Характер температур по толщине бойка (точки 3_1 и 3_S) (а) и приконтактного слоя (точки 3_1 и 3_5) (б) от воздействия на бок теплового потока (TP) и охлаждения водой (OXL).

$\alpha_1=2000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, плотность теплового потока 4 МВт/м^2

Таблица 1

Значения температур в точках, расположенных на рабочей поверхности бойка и на глубине 5 мм

Обозначение точки	Плотность теплового потока – 4 МВт/м^2 , $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	
	TP	OXL
1_1	313	221
1_5	215	215
2_1	333	238
2_5	237	237
3_1	343	247
3_5	248	248
4_1	332	238
4_5	236	236
6_1	183	135
6_5	135	135
7_1	188	139
7_5	140	140

Примечание. TP – температура в конце контакта, а OXL – в конце паузы при охлаждении рабочей поверхности бойка водой.

Таблица 2

Значения температур в точках, расположенных на задней поверхности бойка

Обозначение точки	Плотность теплового потока 4 МВт/м^2 , $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	
	TP	OXL
1_S	61	61
2_S	41	41
3_S	28	27
4_S	27	27
6_S	37	37
7_S	27	27

Примечание. TP – температура в конце контакта, а OXL – в конце паузы при охлаждении рабочей поверхности бойка водой.

Заключение

Таким образом, на основании расчетов установлено, что для обеспечения экспериментально замеренной температуры на контактной поверхности бойка без каналов на уровне 300°C значения плотности теплового потока следует принимать равным 4 МВт/м^2 , а эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Результаты исследования могут быть использованы для расчета температурных полей бойков при проектировании промышленных установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Список литературы

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. 151 с.
2. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки-полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. 125 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
4. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. http.
5. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel research international. 2011. Vol. 82. P. 1240–1247. doi:10.1002/srin.201100078
6. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // Journal of Materials Processing Technology 210. 2010. P. 336-362.
7. Nalawade R. S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling // Sadhana. 2016. № 1 (41). P. 111–124.

8. Laber K., Knapimsky M., Dyja H., Kavalek A. Influence of the cooling conditions after the rolling process of the temperature distribution on the plate cross section // *Hutník – Wiadomości Hutnicze*. 2012. № 5. P. 328–331.
9. Speicher K., Steinboeck A., Wild D., Kiefer T., Kugi A. An integrated thermal model of hot rolling // *Mathematical and computer modeling of dynamical systems*. 2014. № 1 (20). P. 66–86.
10. Phan T.H., Tieu A.K., Zhu H.T., Kosasih B.Y.A. study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling // *Mechanics and Materials*. 2016. № 846. P 589–594.
11. Yu X., Jiang Z., Zhao J., Wei D. The role of oxide-scale microtexture on tribological behavior in the nanoparticle lubrication of hot rolling. *Tribology International*. 2016. № 93 (A). P. 190–201.

Поступила 27.06.19

Принята в печать 29.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

NUMERICAL DETERMINATION OF THE HEAT FLUX DENSITY ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA OF A STEEL STRIP DEFORMED IN A PILOT CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION UNIT

Oleg S. Lekhov – Dr.Sci. (Eng.), ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MXLekhov38@yandex.ru**Aleksandr V. Mikhalev** – Assistant ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia**Maksim M. Shevelev** – Head of the Non-Destructive Testing Laboratory
Thermal Imaging Centre, Yekaterinburg, Russia**Damir Kh. Bilalov** – Cand.Sci. (Eng.), Associate ProfessorDepartment of Engineering and Vocational Training in Mechanical Engineering and Metallurgy
Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. This research aimed to determine the density of the heat flux supplied to the contact surface of the anvil based on the experimentally measured parameters of the combined steel strip process implemented on a pilot continuous casting and deformation unit. The heat flux density was determined based on the experimentally measured anvil temperature through solving a dynamic heat conduction problem. The problem was solved with the help of the finite element method in a 3D formulation using the ANSYS package. The initial and boundary conditions for solving the problem are given. For solving the dynamic heat conduction problem, the following conditions were taken as initial conditions: the initial temperature of the anvils in the continuous casting and deformation machine, the dimensions of the resultant strip and the steel grade, the strip withdrawal rate and the slab reduction time. The conditions for solving the dynamic heat conduction problem taken as the boundary conditions include the density of the heat flux, which is supplied to the contact surface of the anvil during slab reduction, and the effective heat transfer coefficient, the value of which was determined through experimental data. The average temperature of the anvil contact surface after slab reduction was determined by measuring the temperature of the anvils during an experimental study conducted on a laboratory-scale continuous casting and deformation machine at Urals Pipe Works. The temperature data was used for numerical simulation of the temperature regimes of the anvil to determine the density of the heat flux. The calculated

temperature fields are given for four cross-sections of the anvil for the typical points. The authors established the regularities of temperature distribution across both the thickness of the anvil and the thickness of its contact layer when a continuous casting and deformation machine is used to produce steel sheets.

Keywords: Heat flux density, heat transfer coefficient, unit, continuous casting, anvil, deformation, temperature, finite element.

References

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka nepreryvnogo litia i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub. Teoriya i raschet* [A continuous casting and deformation unit designed to produce pipe steel sheets. Theory and design]. Yekaterinburg: Izdatelstvo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.)
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. *Napryazheniya v sisteme boyki-polosa pri poluchenii listov iz stali na ustanovke nepreryvnogo litia i deformatsii* [Stresses in the anvil-strip system when producing steel sheets in a continuous casting and deformation unit]. Yekaterinburg: Izdatelstvo UMTs UPI, 2018, 125 p. (In Russ.)
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)
4. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0. [http. www.ansys.com](http://www.ansys.com)
5. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel research international*. 2011. Vol. 82. P. 1240–1247. doi:10.1002/srin.201100078

6. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology* 210. 2010. P. 336–362.
7. Nalawade R. S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling. *Sadhana*. 2016. No. 1 (41). P. 111–124.
8. Laber K., Knapimsky M., Dyja H., Kavalek A. Influence of the cooling conditions after the rolling process of the temperature distribution on the plate cross section. *Hutnik – Wiadomosci Hutnicze*. 2012. No. 5. P. 328–331.
9. Speicher K., Steinboeck A., Wild D., Kiefer T., Kugi A. An integrated thermal model of hot rolling. *Mathematical and computer modeling of dynamical systems*. 2014. No. 1 (20). P. 66–86.
10. Phan T.H., Tieu A.K., Zhu H.T., Kosasih B.Y. A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling. *Mechanics and Materials*. 2016. No. 846. P. 589–594.
11. Yu X., Jiang Z., Zhao J., Wei D. The role of oxide-scale microtexture on tribological behavior in the nanoparticle lubrication of hot rolling. *Tribology International*. 2016. No. 93 (A). P. 190–201.

Received 27/06/19

Accepted 29/07/19

Образец для цитирования

Численное определение плотности теплового потока по экспериментальным данным процесса деформации стальной полосы на опытной установке непрерывного литья и деформации / Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 19–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>

For citation

Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Numerical Determination of the Heat Flux Density on the Basis of Experimental Data of a Steel Strip Deformed in a Pilot Continuous Casting and Deformation Unit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 19–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-19-24>
