УДК 669.046.4; 519.8
Н. Н. Бялобжеский, О. А. Евтехова
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОЛОСЫ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА АТАКУЮЩИМИ СТРУЯМИ

Аннотация. *В работе создана и программно реализована математическая модель нагрева движущейся полосы термически тонкого металла системой струй нагретого нейтрального газа. Эта модель представляет собой стационарную двумерную задачу теплопроводности для движущейся с постоянным скоростью полосы с локальными граничными условиями третьего рода, соответствующими заданной схеме расположения атакующих струй и ее параметрам. Для описания теплоотдачи от струй к поверхности полосы использованы эмпирические зависимости. Модель применена для исследования влияния различных параметров системы подачи струй на процесс нагрева полосы металла. При численном моделировании было рассмотрено влияние таких факторов как: скорость движения и толщина полосы металла; количество сопел и характер их расположения относительно полосы; скорость истечения струй, диаметр сопел и расстояние от среза сопла до поверхности полосы.*

Ключевые слова: *математическое моделирование, нагрев движущейся полосы металла, термически тонкое тело, струйный нагрев, атакующие струи, локальный коэффициент теплоотдачи.*

Abstract. *A mathematical model of heating a moving strip of thermally thin metal by a system of jets of heated neutral gas has been created and software implemented. This model is a stationary two-dimensional heat conduction problem for the strip moving with a constant speed with local boundary conditions of the third kind, corresponding to a given layout of attacking jets and its parameters. Empirical dependences are used to describe the heat transfer from the jets to the strip surface. The model is used to investigate the effect of various parameters of the jet supply system on the process of metal strip heating. Numerical modeling considered the influence of such factors as: velocity and thickness of metal strip; number of nozzles and character of their location relative to the strip; jet flow rate, nozzle diameter and distance from the nozzle cut to the strip surface.*

Key words: *mathematical modeling, heating of a moving strip of metal, thermally thin body, jet heating, attacking jets, local heat transfer coefficient.*

Современная промышленность ориентирована на получение листового металла, для достижения соответствующих структуры и свойств которого после холодной прокатки необходима термическая обработка. Обычно она осуществляется либо в протяжных, либо в садочных печах, и каждый из вариантов, как известно, обладает своими недостатками. В то же время известны агрегаты скоростного струйного нагрева металла [1-3], в которых осуществляется непосредственное воздействие струй продуктов сгорания на поверхность нагреваемого металла. Однако для термообработки листового проката струйный нагрев в его исходном варианте использовать нельзя, поскольку термообработке подлежит уже практически готовая продукция, которую нельзя подвергать окислению. Возможность создания системы нагрева полосы движущегося металла атакующими струями нейтрального газа (предварительно получившего теплоту от

© Бялобжеский Н. Н., Евтехова О. А., 2022

продуктов сгорания в каком-либо теплообменном устройстве) требует тщательного изучения как с точки зрения технических возможностей, так и с позиций экономической рентабельности.

В данной работе методами математического моделирования исследуется интенсивность нагрева полосы металла системой струй, т. к. только если этот процесс будет происходить достаточно эффективно, имеет смысл проектировать соответствующий агрегат и оценивать его техническую, а также – экономическую эффективность.

Целью данной работы является математическое моделирование нагрева движущейся полосы металла системой струй.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для движущейся полосы может быть записано как трехмерное нестационарное уравнение с граничными условиями третьего рода; допущение о термической тонкости металла позволяет проинтегрировать это уравнение по толщине полосы, записав относительно средней по толщине температуры. При этом граничные условия на нижней и верхней поверхностях полосы превратятся в источниковые члены двумерного уравнения, и дифференциальная задача примет следующий вид [4]:

$$\rho c u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\alpha^{\downarrow}\left(T_0^{\downarrow} - T\right) + \alpha^{\uparrow}\left(T_0^{\uparrow} - T\right)}{\delta}, \; 0 < x < L, \; -\frac{B}{2} < y < \frac{B}{2}, \quad (1)$$

$$T(0, y) = T_{\text{н}}, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=-B/2} = \alpha^{\rightarrow}\left(T_0^{\rightarrow} - T_{y=-B/2}\right); \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y}\big|_{y=B/2} = \alpha^{\leftarrow}\left(T_0^{\leftarrow} - T_{y=B/2}\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=L} = 0. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) использованы следующие обозначения: x и L – координата вдоль полосы металла и длина рассматриваемого участка, м; y и B – координата по ширине и сама ширина полосы, м; δ – толщина полосы, м; ρ и c – плотность, кг/м^3, и удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), материала полосы; λ – коэффициент теплопроводности материала полосы, Вт/(м·К); $T_0^{\rightarrow}$ и $T_0^{\leftarrow}$, $T_0^{\uparrow}$ и $T_0^{\downarrow}$ – температуры греющей среды по бокам полосы, а также – снизу и сверху, К; $\alpha^{\rightarrow}$ и $\alpha^{\leftarrow}$, $\alpha^{\uparrow}$ и $\alpha^{\downarrow}$ – коэффициенты теплоотдачи на левой и правой торцевых поверхностях полосы, а также на нижней и верхней ее поверхностях, Вт/(м^2·К); $T_{\text{н}}$ – начальная температура полосы (однородная по сечению) на входе в рассматриваемый участок, К.

Для численного решения дифференциальной задачи (1)–(4) использовали метод конечных разностей (метод разностной аппроксимации), позволивший заменить эту систему системой алгебраических уравнений, связывающих значения температуры $T_{i,j}$ в узлах расчетной сетки, имеющей шаг ΔX в продольном направлении и шаг Δy поперек полосы

$$u(\rho c)_{i,j}\frac{T_{i+1,j}-T_{i-1,j}}{2\Delta x}=\frac{\lambda_{i+1/2,j}\cdot\frac{T_{i+1,j}-T_{i,j}}{\Delta x}-\lambda_{i-1/2,j}\cdot\frac{T_{i,j}-T_{i-1,j}}{\Delta x}}{\Delta x}+$$
$$+\frac{\lambda_{i,j+1/2}\cdot\frac{T_{i,j+1}-T_{i,j}}{\Delta y}-\lambda_{i,j-1/2}\cdot\frac{T_{i,j}-T_{i,j-1}}{\Delta y}}{\Delta y}+\frac{\alpha_{i,j}^{\downarrow}\left(T_{i,j}^{\downarrow}-T_{i,j}\right)+\alpha_{i,j}^{\uparrow}\left(T_{i,j}^{\uparrow}-T_{i,j}\right)}{\delta};\qquad(5)$$

$$u(\rho c)_{i,0}\frac{T_{i+1,0}-T_{i-1,0}}{2\Delta x}=\frac{\lambda_{i+1/2,0}\cdot\frac{T_{i+1,0}-T_{i,0}}{\Delta x}-\lambda_{i-1/2,0}\cdot\frac{T_{i,0}-T_{i-1,0}}{\Delta x}}{\Delta x}+$$
$$+2\frac{\alpha_{i}^{\rightarrow}\left(T_{i}^{0}-T_{i,0}\right)+\lambda_{i,1/2}\cdot\frac{T_{i,1}-T_{i,0}}{\Delta y}}{\Delta y}+\frac{\alpha_{i,0}^{\downarrow}\left(T_{i,0}^{\downarrow}-T_{i,0}\right)+\alpha_{i,0}^{\uparrow}\left(T_{i,0}^{\uparrow}-T_{i,0}\right)}{\delta};\qquad(6)$$

$$u(\rho c)_{i,n_y}\frac{T_{i+1,n_y}-T_{i-1,n_y}}{2\Delta x}=\frac{\lambda_{i+1/2,n_y}\cdot\frac{T_{i+1,n_y}-T_{i,n_y}}{\Delta x}-\lambda_{i-1/2,n_y}\cdot\frac{T_{i,n_y}-T_{i-1,n_y}}{\Delta x}}{\Delta x}+$$
$$+2\frac{\alpha_{i}^{\leftarrow}\left(T_{i}^{0}-T_{i,n_y}\right)+\lambda_{i,n_y-1/2}\cdot\frac{T_{i,n_y-1}-T_{i,n_y}}{\Delta y}}{\Delta y}+\frac{\alpha_{i,n_y}^{\downarrow}\left(T_{i,n_y}^{\downarrow}-T_{i,n_y}\right)+\alpha_{i,n_y}^{\uparrow}\left(T_{i,n_y}^{\uparrow}-T_{i,n_y}\right)}{\delta}.\qquad(7)$$

Для решения этой системы применен «послойный» метод [4], предусматривающий явное описание переноса теплоты в продольном направлении и итерационный учет переноса теплоты в поперечном, что позволило применить для решения этой системы метод прогонки, предусматривающий введение вспомогательных массивов прогоночных коэффициентов α_i и β_i, участвующих в прогоночном соотношении $T_{i,j}=\alpha_i T_{i+1,j}+\beta_i$. С помощью этих коэффициентов разностный аналог условия (4) принимает вид

$$T_{n_x,j}=\frac{\left(4-\alpha_{n_x-2}\right)\cdot\beta_{n_x-1}-\beta_{n_x-2}}{3-\left(4-\alpha_{n_x-2}\right)\cdot\alpha_{n_x-1}}.\qquad(8)$$

В соответствии с рекомендациями работы [5] для вычисления максимального значения коэффициента теплоотдачи α_m (в точке удара струи о поверхность) применены формулы

$$\begin{aligned}Nu_m&=1,6\,\mathrm{Re}_m^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,33}\left(\frac{h}{d_0}\right)^{-0,11}\text{, при }\frac{h}{d_0}<6,2\\ Nu_m&=5,25\,\mathrm{Re}_m^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,3}\left(\frac{h}{d_0}\right)^{-0,77}\text{, при }\frac{h}{d_0}>6,2\end{aligned},\qquad(9)$$

в которых d_0 – диаметр сопла, из которого исходит струя, м (является определяющим размером в критериях Нуссельта и Рейнольдса); h – расстояние от среза сопла до атакуемой поверхности, м.

Изменение локального коэффициента теплоотдачи по атакуемой поверхности описывали экспоненциальной зависимостью

$$\alpha_r = \alpha_m e^{-2r/h}, \tag{10}$$

где r – расстояние от точки пересечения полосы осью струи.

В данной работе соотношение (10) использовали внутри «пятна воздействия», радиус которого был настроечным параметром модели. Для вычисления коэффициентов теплоотдачи между «пятнами воздействия» соседних струй применяли критериальные соотношения для средних (по поверхности полосы) значений коэффициентов теплоотдачи от системы струй, рекомендуемые в работах [6, 7]

$$\begin{aligned} \overline{\mathrm{Nu}}_s &= 0{,}933 \cdot \left(\frac{d_0}{h}\right)^{0{,}625} \cdot \mathrm{Re}_s^{0{,}625} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}, \text{ при } \frac{h}{d_0} \geq 8 \\ \overline{\mathrm{Nu}}_s &= 0{,}286 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}625} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}, \text{ при } \frac{h}{d_0} < 8 \end{aligned}, \tag{11}$$

в которых характерным размером является расстояние между осями струй s.

Для реализации вычислений в соответствии с формулами (5)–(11) была создана расчетная программа в среде Builder C++ 6.0. В результате численного исследования влияния расположения струй на процесс нагрева полосы получено, что для системы струй 12×4 при шахматном расположении средняя по сечению температура полосы практически такая же, как при линейном, но профиль более однородный. Для полосы шириной 1,5 м и толщиной 1 мм, имеющей при входе на участок длиной 20 м температуру 500 °С, зависимость средней по сечению полосы температуры на выходе из этого участка от скорости движения полосы представлена на рис. 1.

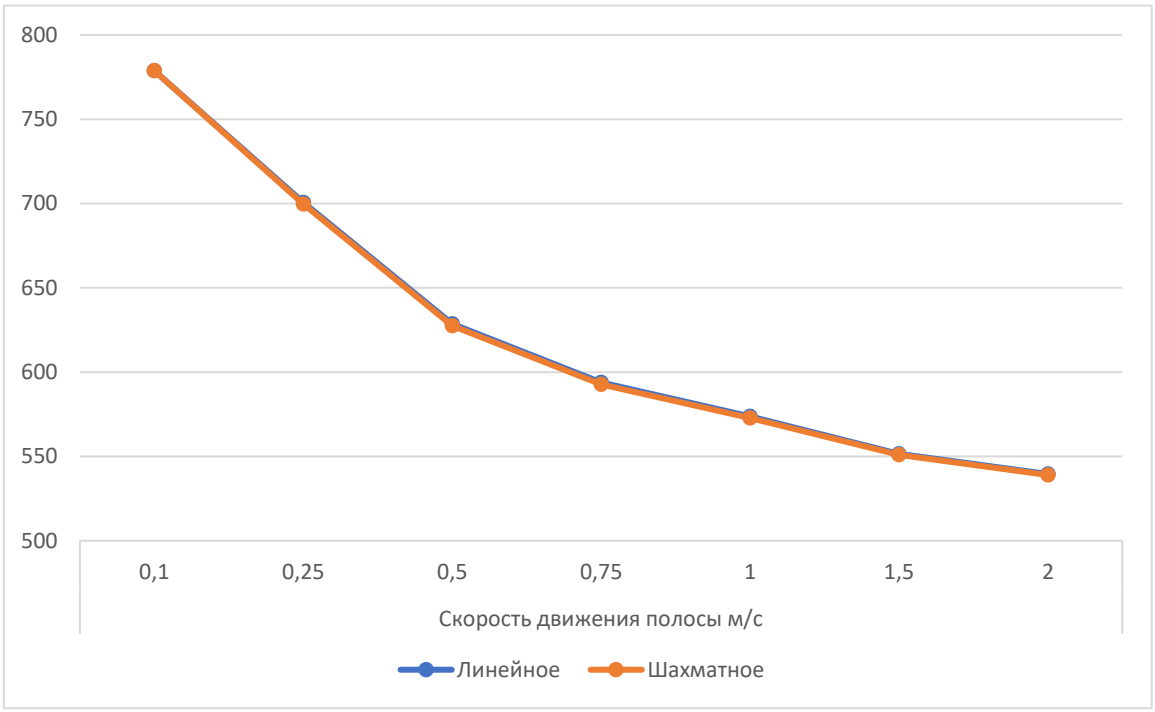

Рис. 1. Зависимость средней по сечению температуры полосы от ее скорости

Список использованных источников

1. Асцатуров В.Н., Краснокутский П.Г., Берковская П.С. Скоростной струйный нагрев металла. – Киев: Техніка, 1984. – 121 с.
2. Исатаев С.И., Жанабаев З.Ж. Теплоотдача тел при струйном обтекании. – Киев: Техніка, 1989. – 304 с.
3. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой // Литьё и металлургия. 2007. №2 (42).
4. Бялобжеский Н.Н. Разработка математической модели и исследование струйного нагрева полосы металла: ВКР магистр металлургии 22.04.02. - Москва, 2020. – 73 с.
5. Ноткин В.Л. Глубокое охлаждение конструкций летательных аппаратов при теплопрочностных испытаниях. – М.: «Спутник+», 2012. – 142 с.
6. Мастрюков Б.С. Теория конструкции и расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с.
7. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник / Под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

УДК 669:504.6

Е. Е. Григорьева[1], И. Н. Файфер[1,2]

[1] ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж – МЦК», г. Екатеринбург, Россия;

[2] ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аннотация. *В статье обозначены основные экологические проблемы металлургического комплекса Российской Федерации, их влияние на окружающую среду и причины возникновения выбросов. Приведены наиболее перспективные пути решения экологических проблем в металлургии на основе наилучших доступных технологий, а также меры, принимаемые Правительством Российской Федерации, для уменьшения негативного влияния промышленности на окружающую среду. В частности, для сокращения выбросов в атмосферу промышленными предприятиями утверждена Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, разработаны два сценария развития – инерционный и интенсивный, определены целевые показатели. Среди мероприятий заявлено оказание мер поддержки в отношении внедрения новых технологий, изменение налоговой, таможенной и бюджетной политики, развитие зелёного финансирования, поддержка технологий улавливания, использования и утилизации парниковых газов.*

Ключевые слова: *металлургия, экология, наилучшие доступные технологии.*

© Григорьева Е. Е., Файфер И. Н., 2022