

УДК 536.3:669.046

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВА ОКИСЛЯЮЩЕГОСЯ МЕТАЛЛА В ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТАХ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА

Денисов М.А., д.т.н., профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника»

Черных В.Н., магистрант кафедры «Теплоэнергетика

и теплотехника» (vladislav.5@mail.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Исследование посвящено разработке метода моделирования процессов нагрева окисляющихся заготовок металла, у которых меняются во времени размеры и толщина слоя окалины. Используемый подход облегчает применение современных программных пакетов для анализа объектов с меняющейся геометрией и за счет этого может резко снизить трудоемкость разработки математических моделей ряда процессов металлургии. Для моделирования процесса окисления металла в работе применен метод эквивалентной теплопроводности. Выполнена экспериментальная проверка метода и показана возможность его использования для совершенствования способов контроля процессов промышленного нагрева. Данный метод отработан при проведении экспериментов на печи с шагающим подом № 3 стана 150 Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода. Проведены расчеты по определению толщины слоя окалины, меняющейся с течением времени, построены соответствующие зависимости. Задача решена в программном пакете ANSYS Multiphysics как задача нестационарной теплопроводности с граничными условиями I рода. При моделировании была построена конечно-элементарная сетка, достаточно подробная для получения достоверных результатов и, в то же время, позволяющая решить задачу на компьютерах малой мощности. В ходе решения был применен ряд упрощений, в частности, упрощение расчетного алгоритма, при котором толщина слоя окалины однозначно определяется температурой поверхности заготовки. Определено распределение температуры по толщине заготовки. Для сравнения значений температур в металле и слое окалины построены графики и изотермы. Также проведено сравнение перепадов температур в слое окалины, определенных расчетным путем для условий опытов на печи и экспериментально. В данном исследовании задача рассмотрена как нестационарная, с изменяющимися границами. Объект исследования – заготовка металла (реальное тело) со слоем окалины, нарастающим со временем. При решении задачи такое реальное тело было заменено условным с постоянными усредненными размерами. По условиям равенства чисел подобия теплофизических процессов были определены свойства условного тела, которые меняются эквивалентно размерам реального тела.

Ключевые слова: металл, печь, окисление, слой окалины, заготовка, эквивалентная теплопроводность, пакет программ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-73-78

Расчетные и экспериментальные исследования нагрева в промышленных печах осложняются влиянием процесса окисления металла и образованием на его поверхностях слоя окалины. При окислении меняются во времени положение границы зон металла и окалины и размеры зон. Появляется дополнительный перепад температуры в слое окалины, затрудняющий контроль температуры металла [1 – 4]. Моделирование процесса теплообмена в телах с переменными размерами, как правило, требует составления индивидуальных вычислительных программ [5 – 12]. Вычислительные проблемы, возможности и методы анализа движения многофазных потоков в программном комплексе ANSYS рассмотрены в работе [13]. Отмечены особенности построения сеток в разных вычислительных моделях, которые могут быть или фиксированными, или деформируемыми для совпадения границ сетки и границ жидкостей. При решении упругой задачи механики разрушения в ANSYS напряжения могут определяться с использованием метода аппроксимации перемещений берегов

трещин и др. [14]. В ANSYS Mechanical применяется метод рождения и смерти элементов для решения задач с меняющимися границами расчетных областей [15].

В данной работе предлагается метод эквивалентной теплопроводности для расчета нагрева тел с переменными размерами, который позволяет моделировать теплофизические процессы в реальных технологических агрегатах, используя существующие программные пакеты инженерного анализа. Метод базируется на применении теории подобия к решению задач нестационарной теплопроводности. Задачи решаются с использованием принципа суперпозиции, позволяющего алгебраически складывать результаты действия взаимно независимых источников тепла. В частности, для трехмерных тел расчетные выражения безразмерной температуры представляются произведением безразмерных температур одномерных тел: $\theta = \theta_x \theta_y \theta_z$. Тогда для параллелепипеда, рассматриваемого как пересечение пластин, решение задачи при граничных условиях третьего рода примет вид:

$$\theta = \psi_x \left(\frac{x}{\delta_x}, Fo_x, Bi_x \right) \psi_y \left(\frac{y}{\delta_y}, Fo_y, Bi_y \right) \times \psi_z \left(\frac{z}{\delta_z}, Fo_z, Bi_z \right), \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точки; $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ – полутолщины тела в направлении осей x, y и z соответственно; Fo_x, Fo_y, Fo_z – числа Фурье, определенные по $Fo_i = \frac{a_i \tau}{\delta_i^2}$, где $i = x, y$ и z соответственно; Bi_x, Bi_y, Bi_z – числа Био, определенные по $Bi_i = \frac{a_i \delta_i}{\lambda_i}$, где $i = x, y$ и z соответственно; a_i, α_i, λ_i – коэффициенты температуропроводности, теплоотдачи и теплопроводности соответственно в момент времени τ .

Из уравнения (1) следует, что если при расчете нагрева разных тел обеспечивать равенство критериев, определяющих развитие процесса в направлении каждой из координат, то будут получены одинаковые значения температуры в точках с одинаковыми относительными координатами (такие точки часто называют «сходственными»). Данное свойство удобно использовать при расчетном анализе процессов в телах с размерами, меняющимися при фазовых превращениях. Например, в рассматриваемой здесь задаче реальные слои окислы и нагреваемого металла заменяются условными телами с постоянными усредненными размерами. Соответственно, определение расчетных параметров выполняется в два этапа. Сначала по отдельным расчетам, справочным или экспериментальным данным определяется изменение фактических параметров во времени, которые должны использоваться в расчетах по реальной схеме с переменной толщиной слоя окислы (эти параметры отмечены индексом «р»). Затем, из условий равенства критериев определяются эквивалентные параметры. При их использовании результаты, полученные по простой расчетной схеме с постоянной толщиной слоя окислы, соответствуют расчетам с фактическими параметрами для процесса с меняющимися размерами зон (отмечены индексом «у»)

$$Bi_y = Bi_p, \text{ т.е. } \frac{a_y S_y}{\lambda_y} = \frac{a_p S_p}{\lambda_p}, \text{ и } Fo_y = Fo_p, \text{ т.е. } \frac{a_y \tau_y}{S_y^2} = \frac{a_p \tau_p}{S_p^2}. \quad (2)$$

Для удобства вычислений при переходе к условной схеме расчета удобно принять $\tau_y = \tau_p, \alpha_y = \alpha_p, c_y = c_p$. Тогда

$$\lambda_y = \lambda_p \left(\frac{S_y}{S_p} \right) \text{ и } \rho_y = \left(\frac{S_y}{S_p} \right) \rho_p, \quad (3)$$

где λ_y и λ_p – коэффициенты теплопроводности условного и реального тел соответственно; ρ_y и ρ_p – плотности

условного и реального тел соответственно; S_y и S_p – размеры условного и реального тел соответственно.

Расчеты по методу выполнены в вычислительном пакете программ ANSYS, который предусматривает возможность задания зависимостей свойств материала от температуры. В исходные данные расчета вместо реальных вводятся некоторые средние размеры металла $S_{y,мет}$ и окислы $S_{y,ок}$. В блок табличного задания свойств для каждой температуры вводятся значения свойств λ_y и ρ_y , вычисленные по выражениям (3).

Отработка особенностей применения предложенного метода проводилась как часть исследований по совершенствованию методики теплофизического исследования процесса нагрева окисляющегося металла. Исследования включали эксперименты на печи с шагающим подом № 3 стана 150 Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода. Печь отапливается природным газом и имеет пять зон регулирования температуры. Во время проведения опытов в печи нагревались заготовки с размерами сечения $0,125 \times 0,125$ м и длиной от 8 до 12 м.

Для исследования особенностей тепловой работы печи проведен ряд экспериментов. В начале каждого опыта маркером отмечалась одна из нагревающих заготовок, перемещение которой вдоль печи отслеживалось. Когда заготовка находилась напротив очередного бокового окна печи, через него проводились измерения температуры кладки и поверхности металла контактной термопарой и пирометрами. По данным информационной системы проводился отсчет показаний измерительной аппаратуры печи. Методика измерений температуры описана в работах [16, 17]. Результаты замеров в одном из опытов показаны на рис. 1. Здесь кривая изменения температуры в центре заготовок t_{mc} построена по данным приближенного расчета нагрева одномерной заготовки эквивалентной толщины [18].

Описанный выше метод эквивалентной теплопроводности используется для разработки математического описания процесса нагрева окисляющегося металла. Перед использованием метода необходимо определить распределение по времени толщины слоя окислы S_p , входящей в уравнение (2). Для этого, например, могут использоваться расчетные выражения [1, 19]

$$S = \sqrt{2k_c \tau}, \quad (4)$$

где S – толщина окисленного слоя, см; τ – время, с; $k_c = 0,071 \exp \left(-\frac{33\,000}{1,99T} \right)$ – постоянная окисления, см^2 ; T – температура, К. Расчетные выражения могут записываться несколько иначе:

$$Y = k \sqrt{\tau_1}, \quad (5)$$

где Y – угар металла, г/см²; τ_1 – время, мин; $k = 5,03 \exp\left(-\frac{7269}{T}\right)$ – константа окисления, принятая по данным работы [2] для стали 10.

Расчеты по уравнениям (4) и (5) выполнены с использованием кривых t_{MB} изменения температуры поверхности заготовок, измеренных в опытах (рис. 1). Кривые нагрева разбивались на интервалы с относительным постоянством температуры. Для уравнения (3) использовано выражение для суммарной толщины окалины, образовавшейся в течение интервалов времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ при постоянных окисления $k_{c1}, k_{c2}, \dots, k_{cn}$

$$S_{\Sigma}^2 = 2k_{c1}\tau_1 + 2k_{c2}\tau_2 + 2k_{c3}\tau_3 + \dots + 2k_{cn}\tau_n; \quad (6)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Sigma}^2}.$$

Суммарный для всех интервалов угар металла определялся аналогично:

$$Y_{\Sigma} = \sqrt{k_1^2\tau_{11} + k_2^2\tau_{12} + k_3^2\tau_{13} + \dots + k_n^2\tau_{1n}}. \quad (7)$$

Соответственно, толщина окалины $h = \frac{Y_{\Sigma}}{3,16}$.

При контрольном просчете по выражениям (3) и (4) получены близкие по величине значения толщины окалины. На рис. 2, а показано изменение толщины слоя окалины за время нагрева, определенное расчетом по данным рис. 1.

Задача расчета нагрева заготовки с растущей во времени толщиной слоя окалины на поверхностях решается в программном пакете ANSYS Multiphysics. Для этого процесс представлен задачей нестационарной теплопроводности с граничными условиями I рода. Решения в ANSYS задач такого типа с пошаговыми инструкциями получены в работе [20].

Заготовка рассматривается как составной объект, образованный группой тел (металлом и окалиной). На

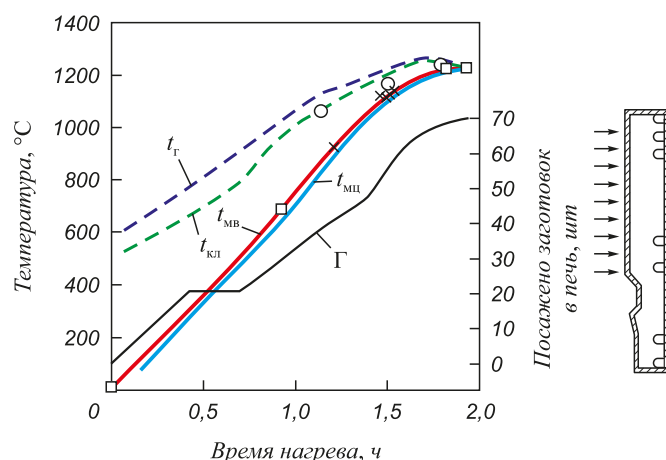


Рис. 1. Результаты исследования теплового режима печи: □ – температура, измеренная контактной термопарой; × – температура, измеренная оптическим пирометром; ○ – температура в зонах печи (t_1, t_2 и t_3 соответственно); t_{MB}, t_{MC} – температуры верхней поверхности и в центре заготовок соответственно; $t_{\Gamma}, t_{\kappa\Gamma}$ – температуры печной среды и кладки соответственно; Γ – график продвижения опытной заготовки по длине печи

Fig. 1. Research results of the furnace thermal regime: □ – temperature measured by contact thermocouple; × – temperature measured by an optical pyrometer; ○ – temperature in the furnace areas (t_1, t_2 and t_3 , respectively); t_{MB}, t_{MC} – temperatures of the billet top surface and in billet center, respectively; $t_{\Gamma}, t_{\kappa\Gamma}$ – temperatures of furnace environment and of the lining, respectively; Γ – movement schedule of the experimental billet along the length of the furnace

наружной поверхности объекта таблицей заданы значения температуры, меняющиеся во времени. Для каждого тела заданы соответствующие температуре материалов свойства. Конечно-элементная сетка, наложенная на объект, показана на рис. 2, б. Для снижения погрешности вычислений в области окалины сетка образуется конечными элементами меньшего размера, чем в области металла.

Толщина слоя окалины на поверхностях заготовок изменяется во времени. В агрегатах с движущимся ме-

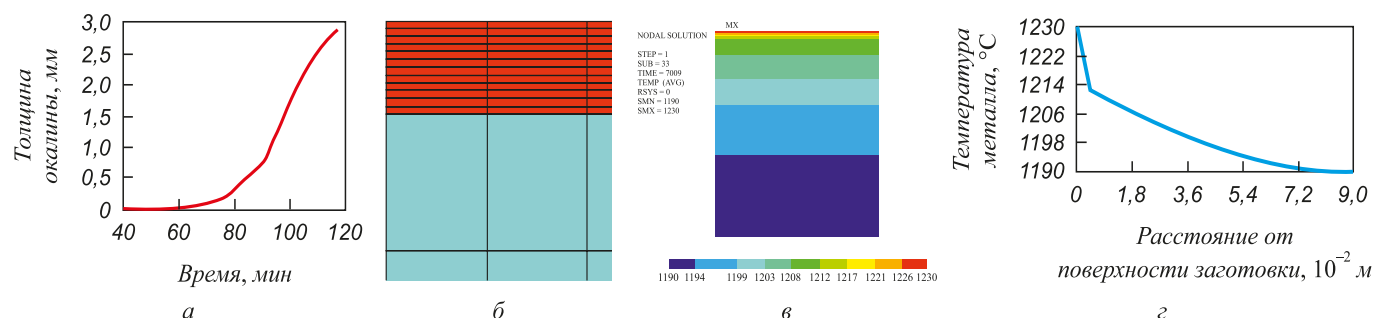


Рис. 2. Построение модели и расчетный анализ процесса нагрева окисляющегося металла: а – изменение во времени толщины слоя окалины; б – фрагмент конечно-элементного разбиения пластины (заготовки) при моделировании нагрева и окисления металла (вверху – слой окалины, внизу – металл); в – распределение температуры по полутолщине заготовки в конце нагрева, представленное в виде изотерм; г – распределение температуры по полутолщине заготовки в конце нагрева

Fig. 2. Construction of the model and research analysis of heating process of the oxidizable metal: а – change in time of scale layer thickness; б – a fragment of the finite element partition plate (billet) for modeling of heating and oxidation of the metal (at the top – a layer of scale, in the bottom – metal); в – temperature distribution along the half-thickness of the billet at the end of heating, represented by isotherms; г – temperature distribution along the half-thickness of the billet at the end of heating

Задание параметров окалины в зависимости от температуры

Setting scale parameters depending on temperature

$t_{\text{мет}}, ^\circ\text{C}$	0	200	400	600	800	1000	1200	1260
$S_{\text{р.ок}}^*, \text{мм}$	0	0	0	0,003	0,033	0,25	1,7	4,4
$\lambda_{\text{р.ок}}, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,4	2,55
$\rho_{\text{р.ок}}, \text{кг/м}^3$	4100							
$S_{\text{у.ок}}, \text{мм}$	3,0							
$\lambda_{\text{у.ок}}^{**}, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	7,2	3,27	1,56
$\rho_{\text{у.ок}}^{**}, \text{кг/м}^3$	683,3	683,3	683,3	687,4	728,4	1025,0	3006,7	6696,7

* Задавалась начальная толщина окалины, равная 0,5 мм.

** Свойства «условной» окалины определялись при $S_{\text{у.ок}} = 3 \text{ мм}$.

таллом через скорость перемещения можно выразить зависимость толщины окалины от координаты заготовки. Задание свойств как функции времени в ANSYS осложнено необходимостью программирования соответствующего макроса. Для упрощения расчетного алгоритма считалось, что толщина окалины $S_{\text{р.ок}}$ однозначно определяется температурой поверхности заготовки $t_{\text{мв}}$. При монотонном изменении $t_{\text{мв}}$ во времени такое допущение реализуется просто, при периодических изменениях $t_{\text{мв}}$ необходимы дополнительные допущения.

Для иллюстрации методики в таблице показан пример определения исходных данных расчета со свойствами «условных тел с постоянными размерами», обеспечивающими эквивалентность полей температуры. Число столбцов в таблице для наглядности уменьшено, данные соответствуют условиям одного из опытов. Расчет определено распределение температуры по толщине заготовки с окалиной, показанное на рис. 2, в, г в виде изотерм и графика. Из графика видно, что в металле температура относительно равномерна, а в слое окалины резко изменяется из-за ее низкой теплопроводности.

Апробация метода моделирования нагрева окисляющегося металла проведена при сопоставлении результатов расчетов, выполненных для условий описанных выше промышленных экспериментов, с результатами измерений в опытах. Исследования выполнялись в составе работ по совершенствованию методов контроля промышленного нагрева металла. Соответственно, сравнивались погрешности бесконтактного измерения температуры металла пирометрами, определявшиеся или расчетом на основе разработанного метода, или экспериментально по разнице показаний радиационного и оптического пирометра и контактной термопары [18].

На рис. 3 показаны результаты сравнения перепадов температуры по толщине окалины, определенных расчетом для условий опытов 2 и 3 на печи (dt_2 , dt_3), и экспериментальных значений поправок к показаниям пирометра на перепад температуры в окалине, получен-

ных в соответствующих обозначению опытах ($dt_{1\text{оп}}$, $dt_{2\text{оп}}$). Результаты расчетов на рисунке показаны сплошными кривыми, а экспериментальные значения – точками. Сравнение показало, что расхождение данных расчетов и экспериментов не превышает погрешности промышленных измерений. Часть измерений в опытах дала более значительный разброс показаний, но на рис. 3 эти измерения не показаны, так как выполнялись при температуре поверхностей металла до 800°C , не соответствующей рабочему диапазону температуры пирометров.

Выводы. Разработан метод моделирования процессов нагрева окисляющихся заготовок металла, у которых меняются во времени размеры и толщина слоя окалины. Использованный при разработке подход облегчает использование современных программных пакетов для анализа объектов с меняющейся геометрией и за счет этого может резко снизить трудоемкость раз-

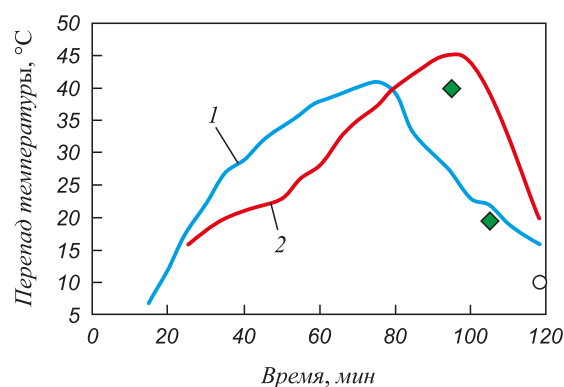


Рис. 3. Сравнение перепадов температуры по толщине окалины, определенных расчетом для условий опытов 2 и 3 (dt_2 (1), dt_3 (2)), и экспериментальных значений поправок к показаниям пирометра, полученные в соответствующих обозначению опытах ($dt_{1\text{оп}}$ (O), $dt_{2\text{оп}}$ (◆))

Fig. 3. Comparison of temperature fluctuations in the thickness of scale, for the calculation of certain experimental conditions 2 and 3 (dt_2 (1), dt_3 (2)), and the experimental values of the amendments to the pyrometer results obtained from the relevant designation of experiments ($dt_{1\text{оп}}$ (O), $dt_{2\text{оп}}$ (◆))

работки математических моделей ряда процессов металлургии.

Выполнена экспериментальная проверка метода. Показана возможность использования метода моделирования для совершенствования способов контроля процессов промышленного нагрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Birks N., Jackson W. A quantitative treatment of simultaneous scaling and decarburization of steels // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1970. No. 1. P. 81 – 85.
2. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
3. Окисление и обезуглероживание стали / А.И. Ващенко, А.Г. Зеньковский, А.Е. Лифшиц и др. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
4. Самойлович Ю.А. Определение перепада температур в слое окалины, растущем на поверхности нагреваемой стальной заготовки // *Нагрев и охлаждение стали, теплотехника слоевых процессов*: Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1970. № 23. С. 71 – 81.
5. Шкляр Ф.Р., Ждановская И.В., Малкин В.М. Влияние окалинообразования на нагрев металла // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1988. № 8. С. 154 – 155.
6. Энергосберегающая технология нагрева слитков / Е.И. Казанцев, Е.М. Котляревский, А.В. Баженов, И.С. Заварова. – М.: Металлургия, 1992. – 176 с.
7. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
8. Панферов В.И., Парсункин Б.Н. Моделирование нагрева окисляющихся массивных тел методом сетов с «подвижными узлами» металла // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1982. № 4. С. 105 – 109.
9. Соловьев А.Е., Яценко Н.М. Решение задачи о движении границы раздела двух сред // *Инженерно-физический журнал*. 1981. Т. XL. № 2. С. 370 – 371.
10. Никитенко Н.И., Кольчик Ю.Н. Математическое моделирование теплопереноса при окалинообразовании // *Инженерно-физический журнал*. 1986. Т. 53. № 1. С. 141 – 148.
11. Панферов В.И. Моделирование нагрева окисляющихся слитков // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1994. № 10. С. 52 – 55.
12. Birks N. Mechanism of decarburization // *Decarburization: the Proc. of the One-day Conference on Decarburization Organized Jointly by the Heat Treatment Joint Committee of the Iron and Steel Institute, the Institute of Metals, and the Sheffield Metallurgical and Engineering Association, and Held at the Inter-Group Laboratories of the BSC (BISRA), Sheffield, on October 28th, 1969. The Iron and Steel Institute, London, 1970. P. 1 – 12.*
13. Bakker A. Расчет многофазных потоков в ANSYS CFD // *ANSYS Advantage*. Русская редакция. № 11. С. 38 – 40. [Электронный ресурс]. <http://ansysadvantage.ru/ANSYS-ADVANTAGE-Rus-11-09.pdf> (дата обращения 25.10.2017).
14. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С.. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
15. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
16. Денисов М.А., Михалев Г.А., Шкляр Ф.Р., Кузовников А.А. Математическая модель расчета нагрева металла в печах с шагающим подом. Сообщение 2 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1980. № 12. С. 97 – 101.
17. Денисов М.А., Булатов А.Т., Михалев Г.А., Бондаренко В.И. Совершенствование тепловой работы и конструкций металлургических агрегатов // *Тематич. отраслевой сб. (МЧМ СССР)*. – М.: Металлургия, 1982. С. 51 – 53.
18. Денисов М.А., Соловьев К.Г. Расчетно-экспериментальный метод исследования нагрева металла и выбора режимов // *Сталь*. 2010. № 2. С. 90 – 95.
19. Михайленко Ю.Е., Буинцев И.Н., Мосейкина З.Н. Математическое моделирование процесса обезуглероживания стали при нагреве // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1979. № 10. С. 97 – 99.
20. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 149 с.

Поступила в редакцию 3 марта 2017 г.

После доработки 11 октября 2018 г.

Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 1, pp. 73–78.

METHOD OF THE RESEARCH OF OXIDIZABLE METAL HEATING BY SOFTWARE SUITES OF ENGINEERING ANALYSIS

M.A. Denisov, V.N. Chernykh

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article is devoted to the development of a method for modeling the heating of oxidized metal billets, in which the dimensions and thickness of the scale layer vary with time. The approach used in this development facilitates the appliance of modern software packages for the analysis of objects with varying geometry; and due to this the complexity of developing mathematical models of several metallurgical processes can be dramatically reduced. To simulate the process of metal oxidation, the method of equivalent thermal conductivity was used. The experimental verification of the method is performed and the possibility of its use for improving the methods of controlling the processes of industrial heating is shown. This method was worked out during experiments on the furnace №3 with walking beam of the mill 150 at Nizhne-Serginsk Hardware and Metallurgical Plant. Calculations were made to determine the thickness of the scale layer, which varies with time; the corresponding dependencies were constructed. The problem was solved by ANSYS Multiphysics software package as

a problem of non-stationary heat conduction with boundary conditions of the first kind. During modeling, a finite-element grid was constructed, sufficiently detailed to obtain reliable results and, at the same time, allowing to solve the problem on low-power computers. In the course of solution, a number of simplifications were applied, in particular, simplification of the computational algorithm, in which the thickness of the scale layer is uniquely determined by surface temperature of the billet. Temperature distribution along the billet's thickness was determined. Graphs and isotherms were constructed to compare values of the temperatures in metal and in scale layer. Also, a comparison of the temperature differences in the scale layer determined by the calculation method was made for the furnace and experimental conditions. In this study, the problem is considered as nonstationary, with varying boundaries. The research object is preparation of the metal (real solid) with scale layer, increasing with time. When solving a problem, this real solid was replaced by a conditional one with constant averaged dimensions. According to the equality of thermophysical processes, properties of the conditional solid were determined, whose change is equivalent to the dimensions of the real solid.

Keywords: metal, furnace, oxidation, scale layer, billet, equivalent thermal conductivity, software package.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-73-78

REFERENCES

1. Birks N., Jackson W. A quantitative treatment of simultaneous scaling and decarburization of steels. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1970, no. 1, pp. 81–85.
2. Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Okislenie i obezугlerozhivanie stali v protsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Oxidation and decarburization of steel in heating processes at pressure treatment]. Moscow: Teplotekhnika, 2006, 200 p. (In Russ.).
3. Vashchenko A.I., Zen'kovskii A.G., Lifshits A.E. etc. *Okislenie i obezугlerozhivanie stali* [Oxidation and decarburization of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 336 p. (In Russ.).
4. Samoilovich Yu.A. Determination of temperature drop in scale layer growing on the surface of heated steel billet. In: *Nagrev i okhlazhdenie stali, teplotekhnika sloevykh protsessov: sb. nauch. tr.* [Heating and cooling of steel, heat engineering of layer processes: Coll. of sci. papers]. Moscow: Metallurgiya, 1970, no. 23, pp. 71–81. (In Russ.).
5. Shklyar F.R., Zhdanovskaya I.V., Malkin V.M. Effect of scale formation on metal heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1988, no. 8, pp. 154–155. (In Russ.).
6. Kazantsev E.I., Kotlyarevskii E.M., Bazhenov, Zavarova I.S. *Energosberegayushchaya tekhnologiya nagreva slitkov* [Energy-saving technology of heating ingots]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 176 p. (In Russ.).
7. Butkovskii A.G., Malyi S.A., Andreev Yu.N. *Upravlenie nagrevom metalla* [Control of metal heating]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 272 p. (In Russ.).
8. Panferov V.I., Parsunkin B.N. Simulation of heating of oxidizable massive solids by the method of sets with “moving nodes” of metal. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 4, pp. 105–109. (In Russ.).
9. Solov'ev A.E., Yashchenko N.M. Solution of the problem of the motion of the interface between two media. *IFZh*. 1981, vol. XL, no. 2, pp. 370–371. (In Russ.).
10. Nikitenko N.I., Kol'chik Yu.N. Mathematical modeling of heat transfer in case of scale formation. *IFZh*. 1986, vol. 53, no. 1, pp. 141–148. (In Russ.).
11. Panferov V.I. Modeling of oxidizable slabs heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1994, no. 10, pp. 52–55. (In Russ.).
12. Birks N. Mechanism of decarburization. In: *Decarburization: the Proc. of the One-day Conference on Decarburization Organized Jointly by the Heat Treatment Joint Committee of the Iron and Steel Institute, the Institute of Metals, and the Sheffield Metallurgical and Engineering Association, and Held at the Inter-Group Laboratories of the BSC (BISRA), Sheffield, on October 28th, 1969*. The Iron and Steel Institute, London, 1970, pp. 1–12.
13. Bakker A. Calculation of multiphase flows in ANSYS CFD. *ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya*, no. 11, pp. 38–40. Electronic resource. Available at URL: <http://ansysadvantage.ru> ANSYS-ADVANTAGE-Rus-11-09.pdf (Accessed 25.10.2017). (In Russ.).
14. Morozov E.M., Muizemnek A.Yu., Shadskii A.S. *ANSYS v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya* [ANSYS in the hands of an engineer: Mechanics of destruction]. Moscow: LENAND, 2010, 456 p. (In Russ.).
15. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and problems]. Moscow: Komp'yuter Press, 2002, 224 p. (In Russ.).
16. Denisov M.A., Mikhalev G.A., Shklyar F.R., Kuzovnikov A.A. Mathematical model for calculation of metal heating in furnaces with walking beam. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 12, pp. 97–101. (In Russ.).
17. Denisov M.A., Bulatov A.T., Mikhalev G.A., Bondarenko V.I. Perfection of thermal work and designs of metallurgical aggregates. In: *Tematich. otraslevoi sb. (MChM SSSR)* [Thematic industrial directory (USSR Ministry of Ferrous Metallurgy)]. Moscow: Metallurgiya, 1982, pp. 51–53. (In Russ.).
18. Denisov M.A., Solov'ev K.G. Selection of the best metal-heating conditions. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 2, pp. 195–200.
19. Mikhailenko Yu.E., Buintsev I.N., Moseikina Z.N. Mathematical modeling of the process of steel decarburization at heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979, no. 10, pp. 97–99. (In Russ.).
20. Denisov M.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov. ANSYS i SAE-proektirovanie: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of thermophysical processes. ANSYS i SAE design: Tutorial]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 149 p. (In Russ.).

Information about the authors:

M.A. Denisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Power and Heat Engineering”

V.N. Chernykh, MA Student of the Chair “Thermal Power and Heat Engineering” (vladislav.5@mail.ru)

Received March 3, 2017

Revised October 11, 2018

Accepted December 25, 2018