

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ НАГРЕВЕ ОКИСЛЯЮЩЕГОСЯ МЕТАЛЛА

Моделирование теплообмена в нагреваемом окисляющемся металле требует учета изменения толщины слоя окалины в процессе нагрева. В литературе имеется значительное количество работ, в которых изучается процесс окисления металла. В них для расчета процесса предложен ряд зависимостей, похожих по физическому содержанию, но базирующихся на разных экспериментальных данных. Например, часто используются расчетные выражения, где толщина окисленного слоя S [см] равна

$$S = \sqrt{2k_c \tau}. \quad (1)$$

где τ – время, с; $k_c = 0.071e^{\left(\frac{-33000}{1.99T}\right)}$ – постоянная окисления [см²];
 T – температура, К.

Расчетные выражения могут записываться несколько иначе

$$Y = k\sqrt{\tau_1}. \quad (2)$$

где Y – угар металла [г/см²];

$\tau_1 = \text{время, мин}; k = 5.03e^{(-7269/T)}$ – константа окисления.

Формулы, приведенные выше, получены в предположении постоянства температуры. Их можно использовать при расчете нагрева металла по заданному графику температуры, если, например, разбить кривую на интервалы, внутри которых температура считается постоянной. С учетом (1) записано выражение для расчета суммарной толщины окалины, образовавшейся в течение интервалов времени τ_1, τ_2, \dots при постоянных окисления k_{c1}, k_{c2}, \dots

$$S_{\Sigma}^2 = 2k_{c1}\tau_1 + 2k_{c2}\tau_2 + 2k_{c3}\tau_3 + \dots; S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Sigma}^2}.$$

Суммарный для всех интервалов угар металла определяется аналогично

$$Y_{\Sigma} = \sqrt{(k_1^2 \tau_1 + k_2^2 \tau_2 + k_3^2 \tau_3 + \dots)}.$$

Соответственно, толщина окалины h [см] $h = Y_{\Sigma}/3.16$.

Контрольный просчет показал, что по выражениям (1) и (2) получаются близкие по величине значения толщины окалины. Например, при $T = 1500,5 \text{ K}$ и $\tau = 276 \text{ с}$ получено $S = 0,025 \text{ см}$ и $h = 0,027 \text{ см}$.

Изменение толщины слоя окалины за время нагрева, определенное расчетом показано на рис. 1. Нагрев проводился в условиях эксперимента на промышленной нагревательной печи.

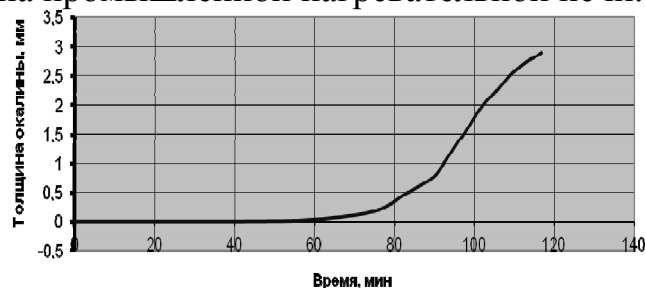


Рис. 1. Изменение во времени толщины слоя окалины на поверхности заготовки, определенное расчетом для условий эксперимента на печи

Нагрев заготовки представлен задачей нестационарной теплопроводности с граничными условиями I рода. Задача решается в ANSYS Multiphysics. Температуры на поверхностях металла задаются таблицей значений во времени. В заготовке выделены зона металла и зона окалины. В каждой зоне заданы соответствующие температуре

материалов свойства, обе зоны имеют независимое конечно-элементное разбиение.

Полученное расчетом распределение температуры по толщине заготовки с окалиной показано на рис. 2 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.

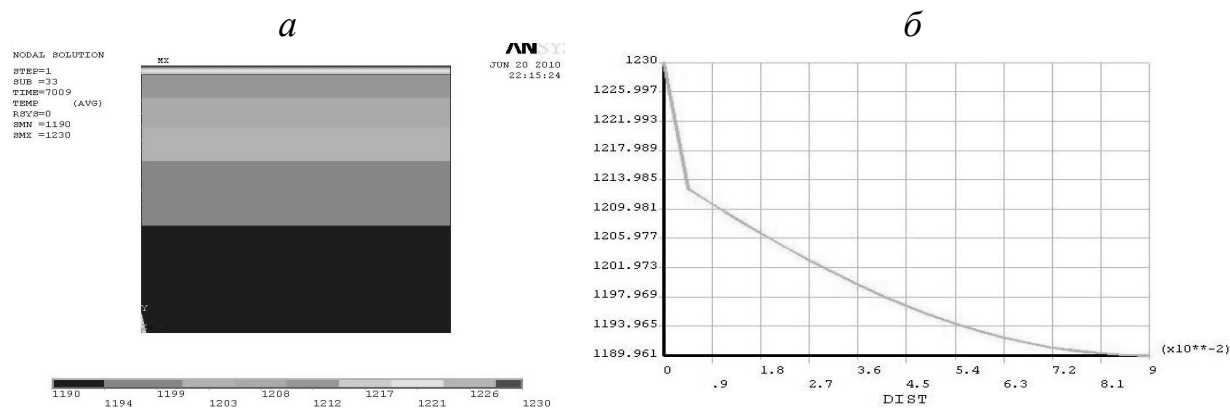


Рис. 2. Распределение температуры по полутолщине заготовки в конце нагрева, представленное: а) в виде изотерм; б) в виде графика, на котором ордината – температура металла в $^{\circ}\text{C}$, абсцисса – расстояние от поверхности заготовки, м

Решение задачи нагрева окисляющейся заготовки осложнено наличием фазовых превращений металла в окалину, толщина слоя которой меняется во времени. Даже в одном из самых проработанных пакетов ANSYS Multiphysics учет фазовых превращений предусмотрен в

ограниченном объеме. В работе предложен метод эквивалентной теплопроводности для расчета нагрева тел с меняющимися размерами [1]. Суть метода состоит в том, что можно искать эквивалентные тела с постоянными размерами, нагрев которых совпадет с нагревом тел, размеры которых непрерывно меняются во времени. Такой метод расчетов может облегчить вычислительную процедуру благодаря постоянству размеров объекта.

Апробация метода моделирования проведена при просчете результатов промышленных экспериментов на нагревательной печи с шагающим подом № 3 стана 150 Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода. Подробнее методика измерений описана в работе [2]. Сравниваются погрешности бесконтактного измерения температуры металла радиационным пирометром, определенная расчетом на основе разработанного метода, и определенная экспериментально по разнице показаний пирометра и контактной термопары.

Результаты сравнений на рис. 3 показывают удовлетворительное совпадение данных расчетов и эксперимента. Это подтверждает обоснованность применения разработанной модели теплообмена для расчета нагрева окисляющегося металла.

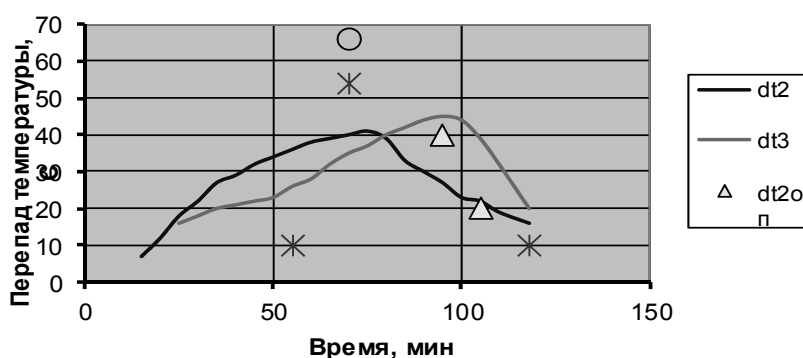


Рис. 3. Сравнение перепадов температуры по толщине окалины, определенных расчетом для условий опытов 2 и 3 (dt_2 , dt_3), и экспериментальные значения поправок к показаниям пирометра, полученные в соответствующих обозначению опытах ($dt_{1оп}$, $dt_{2оп}$, $dt_{3оп}$)

Список использованных источников

1. Денисов М.А., Бугрин И.С. Метод эквивалентной теплопроводности для расчета нагрева тел с размерами, меняющимися при фазовых превращениях // Теплофизические основы энергетических технологий : сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. / Национ. исслед. Томский политех. ун-т. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. С. 78–82.
2. Денисов М.А., Соловьев К.Г. Расчетно-экспериментальный метод исследования нагрева металла и выбора режимов // Сталь. 2010. № 2. С. 90–95.