

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

А. В. Заболотский

ООО «Группа «Магнезит», г. Санкт-Петербург, Россия

Введение

Определение температурного поля тела является одновременно важной технической и сложной математической задачей. Значимость задачи определяется влиянием температурных полей на возникновение термических напряжений в телах. Изучение разрушения конструкций под влиянием термических напряжений проводится с конца XIX века [1]. Современное представление о термостойкости конструкций основывается на определении критериев термостойкости, численно соответствующих температурному перепаду на поверхности материала, приводящему к образованию трещин или его разрушению [2, 3].

Наиболее развернутый вариант критерия термостойкости представлен следующим выражением:

$$\Delta T_d = \frac{\sigma_d \cdot (1 - \mu)}{\psi \cdot E \cdot \alpha} \cdot S. \quad (1)$$

Такой вариант записи критерия позволяет определить разрушающий перепад температуры поверхности образца при «достаточно быстром» ее изменении, реализуемом на практике, например, в виде термоударов.

Скорость изменения температуры поверхности учитывается коэффициентом ψ , который является функцией критерия Био, характеризующего соотношение скоростей теплообмена на поверхности и в толще материала [4].

Применение критериев термостойкости для прогнозирования термического разрушения керамических материалов имеет ряд неудобств, проанализированных в [5]. Применение численных и аналитических методов расчета параметров термического разрушения хрупких материалов рассмотрено в [6] и предложен способ аналитического расчета момента образования разрушающей трещины в материале и соответствующего перепада температуры на его поверхности:

$$\tau_{ts} = \frac{\sigma_d \cdot \rho_{wl} \cdot c_{wl} \cdot \lambda_{wl}}{\alpha \cdot \Delta T_{mp} \cdot \alpha_{he}^2 \cdot E}, \quad (2)$$

$$\Delta T_d = \frac{\sigma_d \cdot e^{\frac{\tau_{ts} \cdot E}{K_1}}}{\alpha \cdot E}. \quad (3)$$

Методы расчета температурных полей исследовались в середине XX века как отечественными, так и зарубежными учеными [7, 8], однако из-за высокой сложности задачи, аналитические решения получены только для некоторых частных случаев теплообмена. В общем случае расчет тепловых полей проводится численными методами. Наиболее распространенным методом моделирования является метод конечных элементов [9].

Метод расчета и объект исследования

В общем случае тело сложной формы, находящееся в состоянии теплового обмена с окружающей средой представлено на рис. 1. В данном случае тело 3 с температурой T_3

находится на границе сред 1 и 2 с температурами T_1 и T_2 соответственно. Внутри тела имеется полость 4 с начальной температурой T_4 , сообщающаяся с окружающей средой. Таким образом, внутренняя часть тела (полость) находится в состоянии конвективного теплообмена. Кроме того, на тело воздействует источник лучистой энергии 5 с температурой T_5 . Для упрощения задачи считаем, что теплообмен между средами 1 и 2 не приводит к изменению температуры этих сред и не влияет на теплообмен между телом 3 и средами.

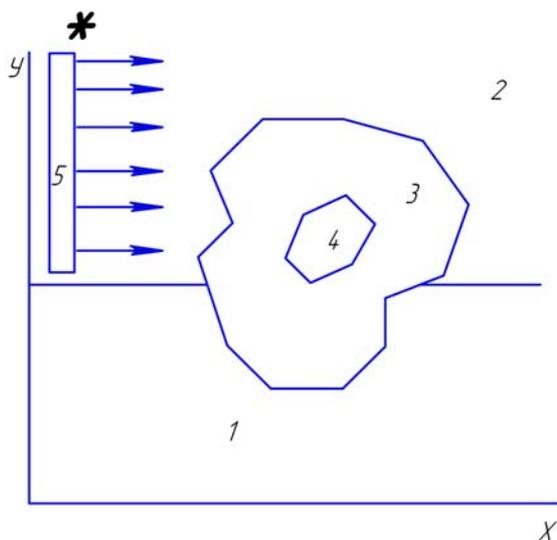


Рис. 1. Тело сложной геометрической формы в состоянии теплообмена с окружающей средой. 1 – 4 – различные среды; 5 – источник лучистой энергии.

В этом случае, для описания температурного поля системы требуется до 13 величин, вычисленных для каждой ее точки (элемента): пространственные координаты, время, масса, теплоемкость как мера рассеивания энергии в точке, теплопроводность, законы теплообмена с соседними точками системы (в общем случае 6 параметров). Эти параметры задаются для каждой точки на стадии постановки задачи, либо вычисляются в каждый момент времени в зависимости от температуры и геометрического положения точки [10]. Дополнительно, для поверхности тела, обращенной к источнику тепла 5, потребуется определить количество теплоты, поступающей излучением. При высокой температуре самого тела 3 может потребоваться учет тепловых потерь излучением и возможных тепловых эффектов фазовых переходов.

В описанном случае сложность задачи определяется оптимальным разбиением тела и прилегающего пространства координатной сеткой и выбором закона теплообмена с окружающей средой для каждой грани тела. Также для оптимизации алгоритма необходимо строго задать последовательность обхода узлов координатной сетки для исключения двойного учета теплообмена между соседними узлами.

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере огнеупорной футеровки патрубка и участка днища циркуляционного вакууматора – аппарата, применяемого в черной металлургии для очистки расплава стали от растворенных газов (RH-процесс). Схема аппарата приведена на рис. 2, овалом выделена область расчета.

Футеровка вакууматора выполнена периклазохромитовым кирпичом (рабочий слой) и корундовым бетоном (внешняя футеровка патрубков). Теплопроводность этих материалов в условиях эксплуатации составляет около $3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Точное значение теплопроводности и теплоемкости для каждой точки определялось при помощи аппроксимирующих полиномов согласно [11], в зависимости от температуры в точке.

При эксплуатации вакууматора, например, при предварительном разогреве или обработке металла нагрев расчетной области происходит по вертикальным рабочим поверхностям патрубков и по горизонтальной поверхности днища. Теплоносителем при обработке металла служит расплав стали, а при предварительном разогреве – газовый факел,

введенный во внутреннее пространство установки сверху. Охлаждение происходит путем естественной конвекции на нижней горизонтальной поверхности, контактирующей с атмосферным воздухом. Кроме того, внутренняя полость пространства между патрубками также является зоной интенсивного охлаждения. В эту зону введены форсунки, подающие холодный воздух под давлением до 5 атмосфер (в верхних углах полости), а также возникают потоки воздуха вдоль остальных поверхностей полости, как за счет вдуваемого газа, так и за счет естественной конвекции. Расчетная средняя скорость движения воздуха в полости составляет около 2 м/с.

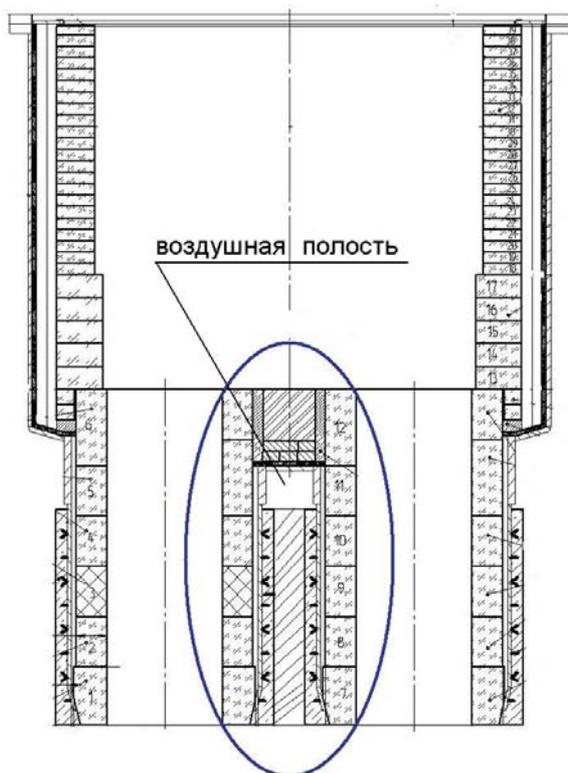


Рис. 2. Схема циркуляционного вакууматора. Овалом обозначена расчетная зона.

Скорость движения воздуха в зоне охлаждающих труб (форсунок) определяли в соответствии с выражением [12]:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_0)}{\rho \cdot \left(1 - \frac{q_1^2}{q_0^2}\right)}} \quad (4)$$

Предварительный разогрев футеровки осуществляется с целью удаления технологической воды из кладочных растворов и огнеупорных бетонов футеровки, смягчения термического удара при начале эксплуатации и снятия термических напряжений путем изотермической выдержки футеровки в условиях, близких к штатным условиям эксплуатации. На практике применяются длительные режимы подготовки оборудования к эксплуатации, продолжающиеся в течение 2 – 4 суток. Такой процесс предварительной подготовки включает несколько стадий нагрева, выдержки при постоянной температуре, а иногда и охлаждения для осуществления некоторых подготовительных мероприятий (обслуживание газовых магистралей, ремонта металлического кожуха оборудования и т.п.).

При моделировании температурного поля участка футеровки патрубков циркуляционного вакууматора в процессе предварительного разогрева, считали, что температура поверхностей футеровки, контактирующих с теплоносителем, изменяется в соответствии с заданным режимом разогрева оборудования. В общем случае температура рабочей поверхности футеровки может быть определена расчетным путем, исходя из

температуры внутреннего теплоносителя и его скорости движения [13]. Нагрев или охлаждение внутренних элементов футеровки моделировались за счет теплообмена теплопроводностью с соседними элементами. Теплоотдача в окружающую среду определялась для каждого элемента охлаждающей поверхности аппарата в зависимости от значения критериев Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr) и Нуссельта (Nu) [10] для этой поверхности.

Для того, чтобы избежать «накопления ошибки» при расчете по направлению теплового потока и против него, в системе изменялся порядок обхода узлов при каждом цикле расчета. Расчет был осуществлен при помощи специального программного обеспечения. В основу алгоритма положены метод конечных элементов и законы теплообмена на внешних поверхностях и внутри области расчета.

В результате расчета была получена таблица, содержащая данные о координатах точек, моментах времени и температуре в этих точках. Шаг по времени при расчете был принят равным 1 секунде, в расчетной области было выделено около 20 тысяч элементов (точек). Предварительный разогрев вакууматора моделировали в течение 44 часов. Таким образом, полная карта предварительного разогрева области расчета содержит информацию о результате более чем 3 миллиардов вычислений. Для удобства анализа полученная информация была представлена в графическом виде: для значимых моментов времени (через определенный интервал) создавался образ расчетной зоны, на котором участки с различной температурой элементов выделены цветом.

Результаты и обсуждение

Стандартный предварительный нагрев футеровки вакууматора проводят в течение 44 часов. В результате нагрева достигается температура рабочей поверхности футеровки 1100 °С. В качестве иллюстрации работы предлагаемого алгоритма рассмотрим завершающие этапы нагрева: разогрев от 800 до 1100 °С со скоростью 75 °С/час и выдержку в течение 4 часов при температуре 1100 °С.

Во время нагрева и изотермической выдержки проводится подача охлаждающего воздуха сквозь форсунки в полости между патрубками под давлением 5 атмосфер. Температурные карты расчетной области приведены на рис. 3 (ввиду симметрии для наглядности изображены только правые части графических образов). Цвета, не указанные в легенде рис. 3, соответствуют температуре от 100 до 750 °С; цифры под картами обозначают время в часах, прошедшее после начала нагрева от 800 °С.

Плотные и высокотеплопроводные огнеупоры рабочего слоя футеровки днища и патрубков вакууматора обеспечивают быстрое распространение тепла. При скорости нагрева рабочей поверхности 75 °С/час, скорость нагрева глубинных слоев футеровки днища достигает 50 °С/час. Также высокой теплопроводностью огнеупора объясняется глубина влияния охлаждающего воздуха, подаваемого через форсунки в верхние угловые участки полости (узкая зона пониженной температуры, распространяющаяся выше углов полости). Влияние этого охлаждения распространяется на всю толщину футеровки. При этом равновесие не устанавливается даже после 4-часовой выдержки (на рис. 3 образы, соответствующие 5 – 8 часам).

Охлаждение форсунками также является причиной температурного перепада на верхней поверхности охлаждаемой полости от 130 до 800 °С. Такие значения температуры и ее перепад, достигаемые на поверхности металлического кожуха аппарата, могут приводить к деформации металла, что неоднократно наблюдалось при ремонтах оборудования.

Внутренняя полость огнеупорной футеровки патрубков оказывает существенное влияние на температурную карту области расчета. Являясь тепловым сопротивлением, внутренняя полость экранирует нижнюю часть системы от разогретой футеровки днища вакууматора и боковые поверхности друг от друга. Нижняя и боковые поверхности полости

нагреваются до температуры, не превышающей 250 °С (результат расчета 150 – 220 °С), вследствие эффективного охлаждения движущимся воздухом.

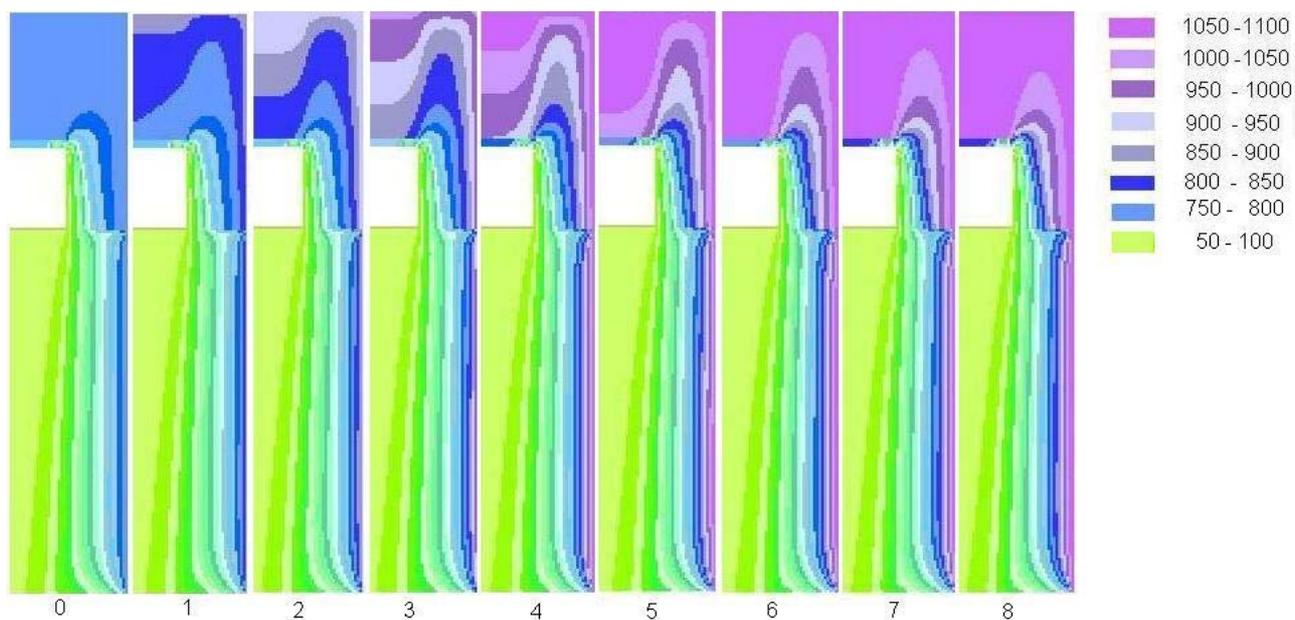


Рис. 3. Температурные карты расчетной зоны для двух заключительных этапов термообработки.

Характерная наклонная изотерма ниже полости объясняется ослаблением влияния охлаждающей полости по мере удаления от нее. Закругляющиеся в сторону горячей поверхности изотермы (ниже охлаждающей полости), объясняются одновременным влиянием вертикальной горячей рабочей поверхности и интенсивного конвективного охлаждения нижней грани патрубка.

Противоположное влияние охлаждаемой внутренней полости и нагреваемой боковой поверхности расчетного участка приводит также к уменьшению расстояния между изотермами в процессе нагрева. Особенно это явление заметно для участка футеровки, расположенного между вертикальными границами полости и вертикальными рабочими поверхностями. Это свидетельствует о большом температурном перепаде на участке, что является предпосылкой для возникновения существенных термомеханических напряжений в футеровке.

Таким образом, предложенная модель и алгоритм расчета температурных полей позволяют строить динамические температурные карты футеровки металлургического оборудования в процессе его эксплуатации для выявления опасных зон с точки зрения возникновения термомеханических напряжений и для предупреждения аварийных ситуаций.

Заключение

В результате проведенного исследования подготовлен алгоритм расчета температурных полей для тел сложной геометрической формы, находящихся в условиях сложного теплового воздействия. Алгоритм может применяться как для определения равновесного (результатирующего) температурного поля, так и для выяснения динамики формирования этого поля.

Разработанный алгоритм расчета реализован в виде компьютерной программы и применен на практике к расчету температурного поля днища и патрубков циркуляционного вакууматора – аппарата черной металлургии, применяемого для очистки расплава стали от растворенных газов.

Работа алгоритма и компьютерной программы рассмотрена на примере предварительного нагрева днища и патрубков циркуляционного вакууматора. Полученные графические температурные карты футеровки позволяют выявить опасные зоны, характеризующиеся высокими температурами, либо резкими перепадами температур. Такие зоны могут послужить источниками зарождения трещин в керамических (огнеупорных) материалах, либо участками пластической деформации металлического кожуха оборудования.

Математическое моделирование температурных полей металлургической аппаратуры позволяет на стадии проектирования разрабатывать оптимизированные схемы футеровок. Реализация таких схем в условиях производства позволяет снизить термические напряжения в конструкциях и уменьшить тепловые потери в окружающую среду. Оба эти фактора положительно отражаются на экономических показателях производства металла за счет экономии энергоносителей, а также увеличения срока службы металлоконструкции и огнеупорной футеровки аппаратов.

Обозначения

ΔT_d - разрушающий перепад температуры, °С; ΔT_{mp} – разность температур материала и среды, °С; σ_d – разрушающее напряжение (предел прочности материала), Па; μ – коэффициент Пуассона; ψ - безразмерный коэффициент, характеризующий скорость прогрева образца; E – модуль упругости, Па; α – коэффициент термического расширения, $1/^\circ\text{C}$; α_{he} – коэффициент теплообмена на поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; K_1 – переменная, характеризующая скорость релаксации напряжений, Па с; S – безразмерный фактор формы; τ_{ts} – интервал времени, за который произошло изменение температуры, с; λ_{wl} – теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м К})$; c_{wl} – теплоемкость материала $\text{Дж}/(\text{кг К})$, ρ_{wl} – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – скорость движения газа, м/с; p_1 и p_0 – давление в подводящей трубе и атмосферное соответственно, Па; q_1 и q_0 – общая площадь сечения форсунок и подводящей трубы соответственно, м^2 , ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Литература

1. Razvan R. Some remarks on the history of fracture mechanics // Proceedings of the 3rd international conference on applied mathematics, simulation, modeling. p. 122-131.
2. Kingery W.D. Introduction to Ceramics / John Wiley and Sons. New York, 1966.
3. Hasselman D.P.H. Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics // J. Am. Cer. Soc., 1969, Vol. 52, p. 600-604.
4. Peitl O., Zanotto E.D. Thermal shock properties of chemically toughened borosilicate glass // Journal of Non-Crystalline Solids, 1999, pp 39-49.
5. Zabolotsky A. V. Mathematics modeling of thermal shock in refractory linings // AISTech 2011 Proceedings, V. II, p. 1279 – 1287.
6. Заболотский А. В. Математическое моделирование термостойкости оксида магния // Новые огнеупоры. 2011, № 6, с. 90 – 98.
7. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1966.
8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
10. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979.
11. Литовский Е. Я., Пучкелевич Н. А. Теплофизические свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: «Химия», 1971.
13. Заболотский А. В. Определение температурного поля в стенке при известных температурах теплоносителей. ММТТ-23, Саратов, 2010, т. 8. с. 101 – 103.