

УДК 536.2/669

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ФУТЕРОВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМОУДАРОВ

Аксельрод Л.М., Заболотский А.В.

*ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Исследовалось разрушение футеровок металлургического оборудования под действием термоударов на примере периклазохромитовой футеровки вакуум-камеры. Рассмотрены два вида термоудара – при разогреве и при охлаждении. Установлено, что характер разрушений огнеупора в результате этих двух видов термоударов различен. Методом конечных элементов построено динамическое

тепловое поле футеровки и определены термические напряжения в футеровке во время термоударов. Рассчитан размер трещин футеровки. Найдены моменты времени, наиболее опасные с точки зрения термического повреждения футеровок. Результаты расчета находятся в удовлетворительном соответствии с измеренными параметрами поврежденной футеровки по окончании кампании аппарата.

### ВВЕДЕНИЕ

Термоудар возникает при быстром изменении температуры исследуемого объекта, как при нагреве, так и при охлаждении. Он является одной из причин повреждения огнеупорных футеровок металлургического оборудования. Наиболее подвержены термоудару аппараты периодического действия. В случае металлургического производства это: сталеразливочные и промежуточные ковши, конвертеры, вакуум-камеры. В меньшей степени от него страдает оборудование, в котором осуществляется непрерывный процесс, либо эффективно проводится обогрев футеровки в промежутках между плавками (ДСП, мартеновская печь, доменная печь). Также под действием термоудара работают элементы машин непрерывного литья заготовок – МНЛЗ (трубы защиты струи металла, погружные стаканы, стаканы-дозаторы, шибберные плиты и т.д.). Термоудар воздействует на огнеупоры как при попадании металлического расплава в охлажденный аппарат, так и при охлаждении футеровки после слива металла. Однако, характер повреждений футеровки от термоударов, произошедших в разных условиях, существенно различается.

Математическое моделирование разрушения огнеупорных футеровок при термоударе позволяет определять безопасные режимы эксплуатации оборудования. При известных параметрах службы аппарата (температура теплоносителей внутри и снаружи, продолжительность различных режимов эксплуатации и температура поверхности кожуха) моделирование позволяет рассчитать прогнозируемую стойкость футеровки или оценить ее состояние (ос-

таточные толщины, возможный характер и геометрию повреждений) в рассматриваемый момент времени.

Направление моделирования термических напряжений в огнеупорных футеровках в настоящее время активно развивается за рубежом [1, 2]. Результаты моделирования позволяют предлагать более устойчивые схемы футеровок металлургического оборудования. Например, с помощью компьютерного моделирования японскими специалистами [3] выявлены наиболее напряженные участки футеровки патрубка циркуляционной вакуум-камеры. Изменение конструкции футеровки этого аппарата в соответствии с результатами расчетов позволило повысить его стойкость приблизительно на 10 %.

В предлагаемой статье рассматривается возможность применения математических методов к моделированию разрушения футеровок под действием термоудара. Рассмотрены особенности термоудара, возникающего как при быстром нагреве, так и при охлаждении огнеупора. Предложен алгоритм расчета возникающих термических напряжений огнеупорных футеровок. Методами прикладной механики рассчитан прогнозируемый размер трещин, возникающих в огнеупорном материале, вследствие термоудара.

В качестве объекта для исследования выбрана стандартная футеровка вакуум-камер с рабочим слоем из огнеупора системы  $MgO-Cr_2O_3$  и эксплуатируемая по режиму, стандартному для оборудования этого типа.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОУДАРА И МЕТОД РАСЧЕТА**

Термоудар, как резкое изменение температуры объекта, провоцирует возникновение термомеханических напряжений в футеровках металлургического оборудования. Причиной возникновения напряжений является термическое расширение или сжатие материала футеровки. Ввиду сравнительно низкой теплопроводности большинства керамических и огнеупорных материалов (менее 10 Вт/м·К) [4] при одностороннем тепловом воздействии (термоударе), внутри футеровки возникает (или резко изменяется) градиент температур. Причем, разность температур в точках, отстоящих друг от друга на несколько миллиметров, может составить сотни градусов. Резкое изменение температуры рабочей поверхности футеровки обусловлено тем, что зачастую металл, с температурой 1550 – 1700 °С подается в агрегат, поверхность футеровки которого имеет температуру 900 °С и ниже (после предварительного разогрева или межплавочного простоя). В другом случае, в аппарат, разогретый после обработки металла до температуры, близкой к температуре металлического расплава, попадает атмосферный воздух, температура которого составляет от – 40 °С до + 40 °С в зависимости от времени года.

Одновременно, огнеупорные материалы обладают сравнительно высоким коэффициентом термического расширения ( $1 - 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) [5]. Данный факт приводит к тому, что более прогретые слои материала футеровки испытывают сжимающие нагрузки со стороны менее прогретых слоев и наоборот. Кроме того, при отсутствии пространства для расширения во время нагрева, огнеупор испытывает дополнительные сжимающие нагрузки со стороны других элементов конструкции аппарата.

Механические напряжения, возникающие под действием перепада температуры, могут быть вычислены в соответствии с законом Гука:

$$\sigma_0 = \Delta T \cdot \alpha \cdot E, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение в материале,  $\Delta T$  – изменение температуры изделия (элемента),  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения материала,  $E$  – модуль упругости материала.

Заметим, что медленное изменение температуры не приводит к появлению существенных механических напряжений из-за явления релаксации напряжений [6]. Возникающие напряжения снижаются с течением времени в соответствии со следующей зависимостью [7]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\tau \cdot E}{K_1}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – действительное напряжение в материале,  $\sigma_0$  – напряжение в материале без учета релаксации (рассчитанное по формуле (1)),  $\tau$  – время, прошедшее с момента начала релаксации,  $E$  – модуль уп-

ругости материала,  $K_1$  – константа, характеризующая скорость релаксации напряжений, зависящая от вязких свойств материала. Константа  $K_1$  для керамических и огнеупорных материалов изменяется в пределах от  $10^{15}$  при комнатной температуре до  $10^7 - 10^9$  при температуре службы (1550 – 1700 °С) [8].

Данный факт обуславливает практическое отсутствие термических напряжений в футеровках, разогреваемых перед первой плавкой со скоростью 200 °С/час и медленнее (по стандартному режиму термообработки футеровок металлургической аппаратуры).

При быстром изменении температуры напряжения не успевают снизиться за счет релаксации. В результате, напряжения в материале быстро нарастают и, как будет показано ниже, для отдельных элементов футеровки достигают разрушающих величин.

Резкие повышения или снижения температуры приводят к разрушениям футеровок, которые носят различный характер (рис.1):

- При разогреве рабочий слой футеровки испытывает сжатие. В результате, образуется сетка трещин на поверхности огнеупора (рис.1а).
- При охлаждении – напротив, возникают растягивающие нагрузки, приводящие к образованию единичных глубоких трещин (рис.1 б).

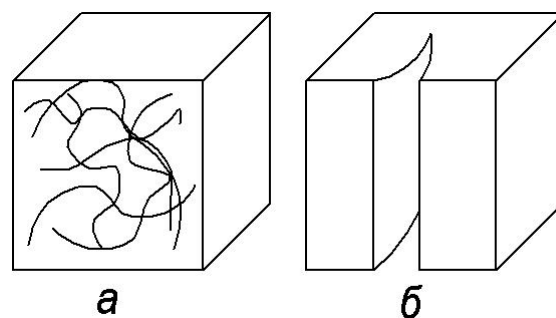


Рис.1. Характер разрушения рабочего слоя огнеупора: а – при резком нагреве; б – при резком охлаждении.

В обоих рассмотренных случаях можно вычислить общую площадь поверхности возникающих трещин, исходя из рассчитанных термических напряжений и энергии разрушения материала (метод «теплового смещения») [9]. Суть расчета заключается в определении избыточной энергии, накопленной в интересующем объеме материала, за счет термических напряжений:

$$U = \sigma \cdot V, \quad (3)$$

где  $U$  – избыточная энергия,  $\sigma$  – термическое напряжение в материале с учетом релаксации (вычис-

ленное по зависимости (2)),  $V$  – рассматриваемый объем материала. Далее следует определить количество химических связей, на разрыв которых потребуется затратить накопленную избыточную энергию:

$$n = \frac{U}{U_0}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество разорванных связей,  $U_0$  – энергия, необходимая для разрыва одной связи (в случае, если в материале присутствуют связи разных видов, следует пользоваться усредненными значениями, с учетом соотношения количества связей разных типов). Зная площадь, приходящуюся на одну связь, можно определить суммарную площадь поверхности возникающей трещины:

$$S_c = n \cdot S_0, \quad (5)$$

где  $S_c$  – суммарная площадь поверхности трещины,  $S_0$  – площадь, приходящаяся на одну связь. Данные о площадях химических связей и энергии их разрыва приводятся в справочной литературе, например [10]. При расчете необходимо учитывать, что в процессе роста трещины образуются две поверхности. Формула (5) позволяет рассчитать суммарную площадь этих двух поверхностей.

Исходными данными для расчета термических напряжений в футеровке металлургических аппаратов, кроме теплоемкости, теплопроводности и модуля упругости материала, является динамическое тепловое поле, возникающее в процессе разогрева или охлаждения оборудования. «Динамическое тепловое поле» означает, что кроме данных о координатах точек и их температуре оно содержит информацию о том, как температура в расчетных точках изменяется с течением времени.

Для определения динамического теплового поля футеровки аппарата использовался метод конечных элементов [11]. При этом учитывались особенности теплообмена на внутренней и внешней поверхности аппарата [12, 13].

На внутренней поверхности аппарата происходит теплообмен либо между расплавом металла и огнеупором (во время обработки металла), либо между воздухом и огнеупором во время предварительной термообработки футеровки и межплавочного простоя. Теплообмен на этой поверхности осуществляется как излучением, так и конвекцией. Расчет температур стенки аппарата и внутреннего теплоносителя в этом случае осуществляется исходя из теплового потока внутри стенки и коэффициента теплоотдачи:

$$T_s = T_a - \frac{Q}{\alpha_o} \quad (6)$$

$$\alpha_o = \alpha_r + \alpha_c \quad (7)$$

$$\alpha_r = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_s \frac{T_a^4 - T_s^4}{T_a - T_s} \quad (8)$$

$$\alpha_c = Nu_a \lambda_a d^{-1}, \quad (9)$$

где  $T_s$  – температура поверхности стенки,  $T_a$  – температура теплоносителя внутри аппарата,  $Q$  – тепловой поток внутри футеровки,  $\alpha_o$  – суммарный коэффициент теплоотдачи,  $\alpha_r$  – коэффициент лучистой теплоотдачи,  $\alpha_c$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $\varepsilon_s$  – степень черноты поверхности стенки,  $Nu_a$  – критерий Нюссельта для внутреннего теплоносителя,  $\lambda_a$  – теплопроводность теплоносителя,  $d$  – характеристический размер аппарата. Тепловой поток внутри футеровки рассчитывается исходя из разности температур теплоносителей внутри и снаружи аппарата и теплопроводящих свойств футеровки:

$$Q = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{\sum \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (10)$$

где  $T_{a1}$  и  $T_{a2}$  – температуры теплоносителей внутри и снаружи аппарата,  $\delta$  – толщины, а  $\lambda$  – теплопроводность слоев футеровки соответственно.

Внутри футеровки, которая является многослойной теплопроводящей стенкой, происходит теплообмен, зависящий от теплопроводности слоев стенки. Расчет температур внутри футеровки проводится по формуле, аналогичной (10), но отношения толщины ( $\delta$ ) к теплопроводности ( $\lambda$ ) не суммируются, а используется отношение для расчетного слоя, в качестве  $T_{a1}$  и  $T_{a2}$  подставляются температуры на границах слоев стенки [14].

На внешней поверхности аппарата осуществляется теплоотдача от горячей стенки к атмосферному воздуху, которая также как и в случае внутренней поверхности осуществляется одновременно конвекцией и излучением. Для расчета используются формулы (6) – (9) после соответствующей замены знаков, поскольку в этом случае температура стенки выше, чем температура теплоносителя (окружающего воздуха) и тепловой поток имеет противоположное направление.

Полученные тепловые поля позволяют рассчитывать термические напряжения в любой точке футеровки в любой момент времени в соответствии с формулами (1) – (2).

Моменты эксплуатации, опасные с точки зрения термического разрушения футеровки, могут быть определены сравнением возникающих термических напряжений с пределом прочности применяемых материалов. В зависимости от того, происходит охлаждение или нагрев футеровки следует использовать пределы прочности либо на сжатие, либо на растяжение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера расчетов рассмотрены оба вида термоударов: происходящие при резком нагреве и при быстром охлаждении огнеупорной футеровки. Считалось, что во время межплавочного простоя, футеровка обогревается газовым факелом с температурой 1350°C (расчетная температура поверхности футеровки имеет такую же величину). Динамическое тепловое поле в футеровке построено при помощи метода конечных элементов в предположении, что предварительный разогрев футеровки проводится равномерно в течение двух суток, после чего аппарат выдерживается при тем-

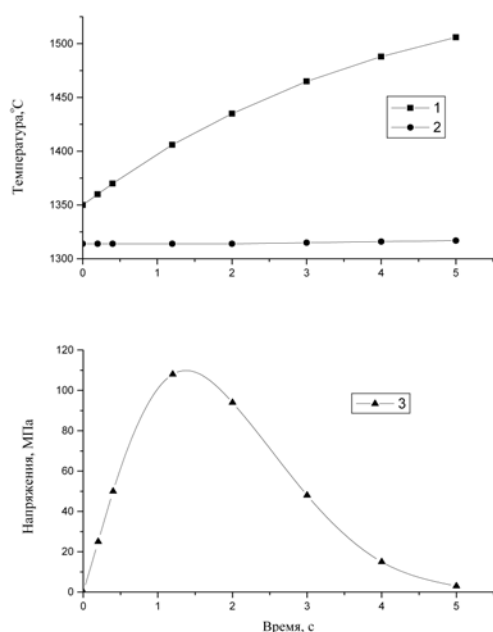


Рис.2. Изменение температуры слоев футеровки и термических напряжений при заливке металла. 1 – температура рабочего слоя, 2 – температура на глубине 10 мм, 3 – термические напряжения.

пературе 1350°C в течение суток.

Термоударом при нагреве считалась заливка металла с температурой 1570°C в аппарат, рабочий слой футеровки которого имеет температуру 1350°C. На рис.2 сверху приведен график изменения температуры поверхности футеровки (линия 1) и ее слоя, находящегося на глубине 10 мм (линия 2). В этих условиях при прогреве рабочего слоя снижаются его показатели вязкости, таким образом, ускоряется релаксация напряжений в материале. Одновременно температура поверхности стремится к температуре металлического расплава, что также снижает движущую силу и скорость разогрева. Зависимость термических напряжений от времени в рабочем слое футеровки приведена на рис.2 (линия

3). Очевидно, что напряжения достигают максимальных значений приблизительно через 1,5 с после заливки металла.

При описанных условиях из-за сопротивления расширению со стороны более глубоких слоев материала и давления соседних элементов, в рабочем слое футеровки возникают сжимающие напряжения. Характерная картина разрушения под действием сжимающих напряжений приведена на рис.1 а. Следует обратить внимание, что за первые 1,5 с процесса, сжимающие напряжения превышают предел прочности материала более чем в 2 раза.

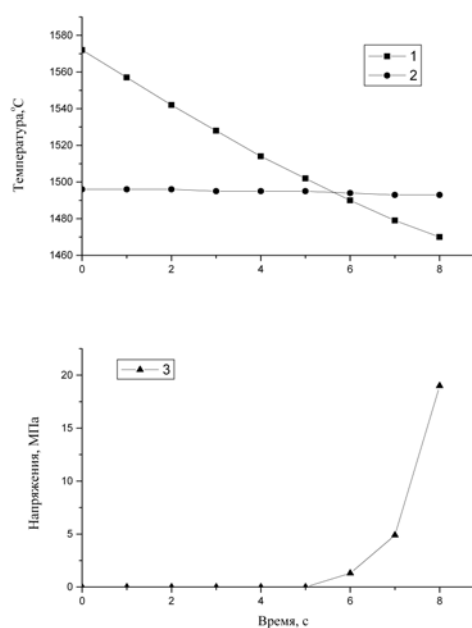


Рис.3. Изменение температуры слоев футеровки и термических напряжений при сливе металла. 1 – температура рабочего слоя, 2 – температура на глубине 10 мм, 3 – термические напряжения.

При резком охлаждении (рис.3) наблюдается обратная картина. После того, как температура рабочего слоя спускается ниже, чем температура более глубоких слоев (это происходит через 5-6 с после начала охлаждения) начинают нарастать растягивающие напряжения рабочего слоя. Одновременно повышается вязкость материала, отчего замедляется релаксация напряжений, в результате напряжения в течение приблизительно 2 – 3 секунд (7 – 10 секунд от начала охлаждения) превышают предел прочности материала на растяжение. Это приводит к возникновению глубоких редких трещин (рис.1 б).

Глубину разрушения материала под действием термоудара можно оценить при помощи формул (3)

– (5). При заливке металла с температурой 1570°C в футеровку, находящуюся при температуре 1350°C следует ожидать возникновения микротрещин в поверхностном слое футеровки, глубина разруше-

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами математического моделирования исследовано разрушение футеровок металлургической аппаратуры под действием термоударов, на примере футеровки вакуум-камеры с рабочим слоем из периклазохромитовых огнеупоров. На основе нескольких методик предложен алгоритм расчета геометрических параметров возникающих трещин. Установлен характер разрушающих нагрузок, возникающих при нагреве и охлаждении футеровки.

Установлено, что при термоударе, сопровождающем резкий разогрев, сжимающие напряжения носят экстремальный характер и приводят к появлению поверхностных трещин глубиной до 5 мм. Определен момент появления этих трещин (через 1 – 3 с после заливки металла). При термоударе, сопровождающем резкое охлаждение, нагрузка монотонно возрастает. На материал в этом случае дейст-

вия футеровки может составлять 4-5 мм. При сливе металла и попадании в аппарат холодного воздуха, глубина возникающих единичных трещин может составить до 120 мм.

вуют растягивающие напряжения, приводящие к образованию редких глубоких трещин в огнеупоре. Глубина таких трещин может достигать 120 мм. Время образования трещин – 7 - 10 секунд от начала охлаждения.

Характер разрушения огнеупорных футеровок существующего металлургического оборудования соответствует характеру разрушений, описанному в данной работе. Исследование геометрических размеров поврежденных футеровок от термоударов на действующей аппаратуре затруднено, поскольку отсутствует возможность детального осмотра футеровки после каждого нагрева или охлаждения. Однако, косвенные данные (скорость износа футеровок и температура кожуха установок) указывают на то, что погрешность расчетов находится в допустимых пределах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. K. Andreev, H. Harmuth. FEM simulation of the thermo-mechanical behavior and failure of refractories.// J.of Mat. Proc. Techn. 2003, v. 143-144, pp. 72-77.
2. I. Ozdemir, W.A.M., Brekelmans, M.G.D. Geers. FEM computational homogenization for the thermo-mechanical analysis of heterogenous solids.// Comp. Meth. Appl. Meth. Eng. 2008, v. 198 №3-4, pp. 602-613.
3. Hideya Okada, Taiichi Ueyama, Koichiro Semura et al. Improvement of №1 RH lower vessel campaign life in Kakogawa Works// SEAIISI Quaterly Journal. 2008, v. 37 № 4, pp. 16-21.
4. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982.
5. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976.
7. Горная энциклопедия: в 5 т./ Гл. редактор Козловский Е. А. – М.: Сов. энцикл., 1984-1991.
8. Горшков В.С., Савельев В.Г., Федоров Н.Ф. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: Учеб. для ВУЗов. М.: «Высшая школа», 1988.
9. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: «Наука», 1974.
10. Гурвич Л.В. и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: «Наука», 1974.
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
12. Заболотский А.В. Модель разогрева футеровки сталеразливочного ковша. // Новые огнеупоры 2010, №4, с. 25.
13. Zabolotsky A. Mathematics modeling for early forecast of casting ladle lining destruction. // 17<sup>th</sup> Steelmaking Conference. Abstract book. Buenos Aires, Argentina, 2009. p. 22.
14. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971.