

УДК 621.74.04

С. И. Репях, А. А. Жегур*

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

* ООО «НТП «Новые машины и технологии», Днепропетровск

О ТЕРМОСТОЙКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ

Разработан параметрический критерий оценки термостойкости керамических оболочковых форм. Установлено, что из числа известных направлений повышения термостойкости керамических оболочковых форм наиболее эффективным является уменьшение толщины их стенок при одновременном увеличении их прочности.

Ключевые слова: отливка, форма, термостойкость, прокаливание, прочность, толщина стенки.

Розроблено параметричний критерій оцінки термостійкості керамічних оболочкових форм. Встановлено, що з числа відомих напрямів підвищення термостійкості керамічних оболочкових форм найбільш ефективним є зменшення товщини їх стінок при одночасному збільшенні їх міцності.

Ключові слова: виливок, форма, термостійкість, прожарення, міцність, товщина стінки.

The self-reactance criterion of estimation of heat-resistance of ceramic thecal forms is worked out. It is set that from a number the known directions increases of heat-resistance of ceramic thecal forms most effective is diminishing of thickness of their walls at simultaneous increase of their durability.

Keywords: founding, form, heat-resistance, heat treatment of forms, durability, thick-ness of wall.

Постановка проблемы и состояние вопроса. Наиболее значимого снижения энергозатрат и сокращения цикла подготовки керамических оболочковых форм (КО) к заливке (прокаливания КО) можно достичь при использовании термостойких КО, например, изготовленных на основе плавленого кварца. Такие КО можно загружать в печь с начальной температурой 900-1000 °С, выдерживать при этой температуре в течение 45-120 мин, извлекать под заливку из печи и заливать сталью без каких-либо разрушений и искривлений КО. То есть использование термостойких КО позволяет не только сократить длительность их прокаливания, но и, не изменяя при этом начальную температуру в прокалочной печи (900-1000 °С), в несколько раз снизить энергоемкость и длительность процесса подготовки КО к заливке. Тем не менее, по ряду причин на отечественных предприятиях при производстве отливок общемашиностроительного назначения по-прежнему используют КО на основе кварцевого песка, характеризующиеся крайне низкой термостойкостью.

Термостойкость КО зависит как от свойств ее материала, так и конфигурационных особенностей, а также габаритных размеров. При низкой термостойкости происходит разрушение тела КО (образование трещин) как в процессе прокаливания и охлаждения КО до заливки, так и в процессе заливки расплава в КО. Причина образования трещин – недопустимо высокие растягивающие напряжения в поверхностном слое нагреваемой (охлаждающейся) КО.

Несмотря на множество работ, посвященных исследованию факторов, определяющих термостойкость кварцевых КО, разработанных критериев и методик оценки термостойкости КО, способов ее повышения, на сегодняшний день данная задача остается нерешенной и актуальной. Одной из причин данного состояния вопроса является отсутствие однозначного параметрического критерия оценки термостойкости КО.

Постановка задачи исследования. Задача исследований – разработка параметрического критерия оценки термостойкости КО.

Основные результаты исследований

Для теоретической оценки влияния параметров на величину напряжений в поверхностном слое КО пластинчатой формы при быстром нагреве (охлаждении) и параболическом законе распределения температур по толщине стенки воспользуемся формулой У. Д. Кингери [1]

$$|\sigma_{\text{пов}}| = \frac{k_2 \cdot E_2 (t_1 - t_2)}{1,5(1 - \mu_2)}, \quad (1)$$

где E_2 – модуль упругости (модуль Юнга) на растяжение материала КО, МПа; k_2 – коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) материала КО в интервале температур от t_1 до t_2 , град⁻¹; μ_2 – коэффициент Пуассона материала КО; t_1, t_2 – температура на внешней и внутренней поверхностях КО соответственно, К.

Сплошность материала КО не будет нарушена (трещины в стенке КО не будут образовываться), если

$$\sigma_{\text{пов}} \leq \sigma_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности на разрыв материала КО, МПа.

Решая (1), приняв $\sigma_{\text{пов}} = \sigma_{\text{в}}$ относительно наибольшего перепада температур между внешней и внутренней поверхностями стенки КО, получаем

$$t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{3 \sigma_{\text{в}} (1 - \mu_2)}{2 k_2 \cdot E_2}. \quad (3)$$

С другой стороны, в соответствии с работой [1]

$$t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot V \cdot X_2^2}{2 \cdot \lambda_2}, \quad (4)$$

где ρ_2 – кажущаяся плотность материала КО, кг/м³; c_2 – удельная теплоемкость материала КО, Дж/(кг · град); λ_2 – коэффициент теплопроводности материала КО, Вт/(м · град); V – скорость нагрева (охлаждения) КО, град/с; X_2 – толщина стенки КО, м.

Приравнивая формулы (3) и (4), решаем полученное тождество относительно V , в результате получаем

$$V = \frac{3}{X_2^2} \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} \frac{\sigma_B (1 - \mu_2)}{k_2 \cdot E_2}; \quad (5)$$

или

$$V = \frac{3 \cdot a_2}{X_2^2} \frac{\sigma_B (1 - \mu_2)}{k_2 \cdot E_2}, \quad (6)$$

где a_2 – коэффициент температуропроводности материала КО, м²/с.

Поскольку скорость нагрева КО прямо пропорциональна и тождественно равна начальной температуре в рабочем пространстве в печи

$$V \equiv \Delta t.$$

то

$$\Delta t \equiv V = \frac{3}{X_2^2} \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} \frac{\sigma_B (1 - \mu_2)}{k_2 \cdot E_2}; \quad (7)$$

или

$$\Delta t \equiv V = \frac{3 \cdot a_2}{X_2^2} \frac{\sigma_B (1 - \mu_2)}{k_2 \cdot E_2}; \quad (8)$$

или

$$\Delta t = Z \frac{3 \cdot a_2}{X_2^2} \frac{\sigma_B (1 - \mu_2)}{k_2 \cdot E_2}, \quad (9)$$

где Z – поправочный коэффициент, с.

По сути, величина Δt , рассчитываемая по формуле (9), и является параметрическим критерием термостойкости КО.

Анализ формулы (9) показывает, что начальная температура в прокалочной печи при загрузке в нее КО может быть тем выше, чем больше коэффициент температуропроводности (больше коэффициент теплопроводности, меньше плотность и удельная теплоемкость) у КО и ее материала, больше предел прочности на разрыв и меньше коэффициент Пуассона, а также, чем меньше толщина стенки, КТЛР и модуль упругости на разрыв. При этом наиболее эффективными параметрами, влияющими на термостойкость КО, являются толщина ее стенки и КТЛР.

Достоверность результатов проведенного анализа подтверждается тем, что в условиях промышленного производства литья термостойкость КО повышают путем создания внутри ее буферного слоя (слоев) или газового зазора между слоями КО, то есть путем создания слоистой структуры КО повышают прочность КО, снижают плотность и удельную теплоемкость материала КО за счет использования в ее структуре пористых материалов, для обсыпки слоев КО применяют материалы с низким КТЛР и т. д. [2].

Следует отметить, что в КО величина КТЛР ее материала практически соответствует величине КТЛР материала, используемого для обсыпки слоев огнеупорной суспензии, наносимой на модельный блок. В связи с этим для повышения термостойкости КО, для обсыпки слоев огнеупорной суспензии на модельных блоках используют крупнозернистые материалы с низкой величиной КТЛР. Использование крупнозернистых материалов с низкой величиной КТЛР позволяет проводить установку

КО на прокаливание при температуре в печи от 900 до 1000 °С и, соответственно, сократить длительность прокаливания КО до 2 ч. Тем не менее, КО, изготовленные на таких материалах, по сравнению с КО, изготовленными на кварцевом песке, имеют ряд существенных недостатков, что следует из табл. 1.

Таблица 1. Недостатки КО

| Материал для обсыпки КО | Недостатки КО* | | | | | | |
|---|----------------|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Кварц плавленный аморфный | + | | | + | + | + | + |
| Шамот высокоглиноземистый, дистен-силлиманит, муллит, окись циркония, силикат циркония, крошка кордиеритовая или сподуменовая | + | + | + | + | | | |

*1 – высокая стоимость по сравнению с кварцевыми КО; 2 – сложность удаления КО из внутренних полостей отливки методом выщелачивания; 3 – существенное увеличение массы; 4 – низкая газопроницаемость; 5 – низкая прочность в “сыром” состоянии; 6 – нарушение размерной точности отливок; 7 – возможно повышение КТЛР при прокаливании и, соответственно, потеря термостойкости

В отношении плавленного кварца следует отметить, что указанная возможность повышения КТЛР КО (табл. 1. п. 7) на основе плавленного кварца при прокаливании и, соответственно, потеря термостойкости обусловлены появлением кристобалита в структуре плавленного кварца КО, который может появиться в процессе экзотермической выдержки КО при ее прокаливании. Кроме того, содержание кристобалита в микропорошке плавленного кварца, входящего в состав огнеупорной суспензии (свыше 5 %), также приводит к образованию трещин и разрушению КО при прокаливании [3].

Указанные в табл. 1 недостатки КО сдерживают их широкое применение в серийном производстве отливок общемашиностроительного назначения на отечественных предприятиях. В связи с этим, по мнению авторов, наиболее перспективным направлением остается использование тонкостенных кварцевых КО, изготовленных на основе природного минерала – кварцевого песка.

Практика работы с кварцевыми КО толщиной $X_2 = 4-16$ мм, изготовленными на кварцевом песке, подтверждает их относительно низкую термостойкость и удовлетворительную прочность. Поэтому использование тонкостенных кварцевых КО с $X_2 < 4$ мм сопряжено с необходимостью решения ряда технических задач, а именно:

- обеспечение высокой прочности КО в “сыром” и прокаленном состояниях;
- создание вокруг КО опорного слоя из монолитного, относительно дешевого (желательно, техногенного происхождения), термостойкого, огнеупорного, газопроницаемого и достаточно прочного материала с величиной кажущейся плотности до 800 кг/м³.

Необходимость использования опорного наполнителя для тонких кварцевых КО обусловлена потребностью обеспечения прочностных характеристик формы, а его низкая кажущаяся плотность – снижением тепловых и временных затрат на прокаливание формы. Кроме этого, использование монолитного опорного наполнителя позволяет проводить прокаливание форм без опок, используя, например, взамен опок поддоны из жаростойкой стали.

Используя формулу (9), можно в первом приближении рассчитать предельно допустимую толщину кварцевой КО с начальной температурой 20 °С, обеспечивающую ее целостность при загрузке на прокаливание КО печь с определенной температурой в ее рабочем пространстве или при заливке КО расплавом металла.

Поскольку [4]

$$\sigma_B = 0,52 \cdot \sigma_{и}, \quad (10)$$

где $\sigma_{и}$ – предел прочности при статическом изгибе КО при ее рабочей температуре, то, приняв в интервале температур от 20 до 600 °С для кварцевой КО величину отношения $\frac{Z(1-\mu_2)}{E_2} = 0,041 \text{ с} / \text{МПа}$ и, допустив, что ее модули Юнга и Пуассона в указанном интервале температур изменяются незначительно, формулу (9) с учетом (10) для кварцевой КО, имеющей начальную температуру 20 °С, запишем в виде

$$X_2^{\max} = \sqrt{\frac{0,064 \cdot a_2 \cdot \sigma_{и}}{k_2 \cdot \Delta t}}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет рассчитать предельно допустимую толщину стенок КО, при которой она не будет разрушаться в результате термического удара в интервале температур от 20 до 600 °С.

Значения теплофизических параметров кварцевой КО с величиной пористости $23 \pm 1\%$ по объему в интервале температур от 20 до 1500 °С рассчитывали по эмпирическим формулам

$$\rho = 2511 \left(1 - \frac{\Pi_{20}}{100}\right) [1 - k_2 (t - 20)]^3; \quad (12)$$

$$c = 626 + 0,197 \cdot t - 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot t^2; \quad (13)$$

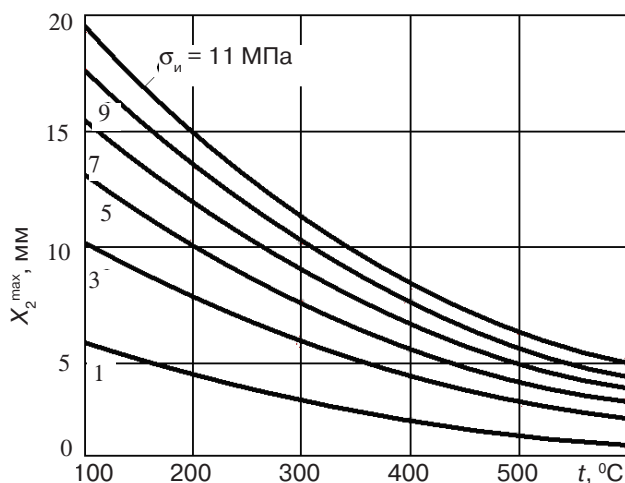
$$\lambda = 0,508 + 4,11 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1,03 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot t^3. \quad (14)$$

Для вычислений по формуле (11) использовали данные табл. 2, полученные экспериментально для КО, изготовленной на основе ГРЭТС, песка кварцевого и кварца пылевидного.

Результаты расчетов по формуле (11) представлены на рисунке.

Таблица 2. Коэффициенты термического линейного расширения КО на основе ГРЭТС, песка кварцевого и кварца пылевидного

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|----|-----|-----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t - 20, \text{ }^\circ\text{C}$ | 0 | 80 | 180 | 280 | 380 | 480 | 580 | 680 | 780 | 880 | 980 | 1080 | 1180 | 1280 | 1380 | 1480 |
| $k_2 \cdot 10^6, \text{ град}^{-1}$ | 0 | 10 | 7,5 | 8,4 | 11,25 | 16 | 21,4 | 19,3 | 17,1 | 16,9 | 17,7 | 18,7 | 22 | 23,5 | 25,5 | 28,7 |



Зависимость предельно допустимой толщины кварцевой КО (с начальной температурой 20 °С) от начальной температуры в прокаточной печи и от предела прочности КО при статическом изгибе

Анализ зависимостей на рисунке показывает, что с повышением начальной температуры в печи и со снижением прочности кварцевой КО ее предельно допустимая толщина понижается и становится менее 5 мм при $\sigma_{и} = 11$ МПа и $t = 600$ °С, то есть для предупреждения разрушения кварцевых КО при их установке в печь для дальнейшего прокаливания и назначения начальной температуры в рабочем пространстве печи также следует учитывать прочность и толщину стенок КО.

Кроме того, полученные данные показывают, что при выплавлении модельного состава из КО, чем ниже температура в печи или среды, в которой выплавляется модельный состав из КО, и прочность КО, тем больше вероятность разрушения КО от термических напряжений.

Выводы

В результате выполненной работы разработан параметрический критерий оценки термостойкости КО. Установлено, что из числа известных направлений повышения термостойкости КО наиболее эффективным является уменьшение толщины стенок КО при одновременном увеличении их прочности.



Список литературы

1. Кингери У. Д. Введение в керамику / Под ред. П. П. Будникова, Д. Н. Полубояринова: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1967. – 500 с.
2. Релях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
3. Грибанов А. С., Савельев Ю. Н., Кучеренко В.С. / Опыт использования плавленого кварца для изготовления огнеупорных оболочек в литье по выплавляемым моделям на Воронежском механическом заводе (ВМЗ) // Литейщик России. – 2005. – № 7 – С. 29-31 .
4. Лакеев А. С. Формообразование в точном литье. – Киев: Наук. думка, 1986 – 256 с.

Поступила 20.02.2012

Вниманию авторов!

*Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.*

*Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.