

УДК 621.6.015

ВЛИЯНИЕ ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ С НАГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В НАЧАЛЬНОМ ПЕРИОДЕ СУШКИ

Осипов С. Н., Ивановский И. К.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Правильное определение чувствительности пластических формовочных масс к сушке во многом определяет выбор технологии сушки, конечной целью которой является получение высококачественной продукции.

Наибольшее практическое применение за последние 30 лет получила ускоренная методика определения чувствительности глин к сушке А. Ф. Чижского [1], которая основана на определении времени появления поверхностных трещин на облучаемом мощным тепловым потоком ($S_0 = (0,7-1,0)$ Вт/см²) плоском образце глинистой массы размером 55х55х10 мм. При использовании столь мощного потока радиационного тепла происходит быстрый нагрев облучаемой поверхности образца и, как следствие этого, буквально с первых секунд начинается процесс испарения влаги, который является сильным охлаждающим фактором. Одновременно с повышением температуры поверхности образца в керамической массе вследствие появления градиента температур между нагреваемой поверхностью и обратной «холодной» стороной образца начинается процесс термоградиентного переноса влаги, в результате которого нагреваемая поверхность обезвоживается. Одновременно обезвоживание нагреваемой поверхности образца происходит за счет испарения влаги. Для того чтобы, аналитически описать и количественно оценить эти два параллельных процесса их следует разделить.

Комплексное аналитическое описание этих процессов предложено А. В. Лыковым и Ю. М. Михайловым [2], но решения сложной системы дифференциальных уравнений столь сложны и получены при условии постоянства коэффициентов, которые существенно изменяются в процессе сушки, что практическое применение этих решений весьма затруднительно. Поэтому при исследовании и модернизации методики А. Ф. Чижского [1] появилась необходимость в отдельной оценке влияния процессов термоградиентного переноса и испарения влаги на поверхностное трещинообразование в результате облучения глинистых образцов.

Как показали наши исследования процессов испарения влаги с облучаемой поверхности образцов формовочной массы, состоящей из 80 % лукомльской гли-

ны и 20 % гранитного отсева, толщиной 30 мм и эксперименты А. Ф. Чижского с образцами из спондиловой глины толщиной 16мм при $S_0 \approx 0,7$ Вт/см² [3], зависимость интенсивности испарения влаги во времени с начала сушки можно аппроксимировать экспоненциальной функцией вида

$$j = j_m [1 - \exp(-\Psi\tau)], \quad (1)$$

где j_m – максимальная интенсивность испарения влаги характерная для первого периода сушки; Ψ – эмпирический коэффициент показателя степени экспоненты, зависящий от интенсивности теплового потока, толщины образца и других факторов; τ – время.

Учитывая аналогичную по форме зависимость роста температуры облучаемой поверхности во времени [4], полученная аппроксимация (1) экспериментальных данных примерно соответствует закону Дальтона.

Часть теплового потока расходуется на испарение влаги $S_b = jr$ (r – удельная теплота парообразования), а величина теплового потока, затраченного на нагрев образца составляет $S_m = S_0 - S_b$ или

$$S = S_0 \exp(-\Psi\tau), \quad (2)$$

Здесь необходимо отметить, что при определении количества теплоты, затраченной на испарение влаги, по уменьшению массы образца Δm фактически определяется интегральная величина

$$\int_0^{\tau} S d\tau = \int_0^{\tau} S_0 (1 - e^{-\Psi\tau}) d\tau, \quad (3)$$

и для определения коэффициента Ψ по результатам каждого эксперимента необходимо графически или на ЭВМ решить трансцендентное уравнение

$$1 - e^{-\Psi\tau} = \frac{r\Psi}{S_0} \left(\frac{S_0\tau}{r} - \Delta m \right), \quad (4)$$

Уравнение Фурье для описания динамики температурного поля в испытываемом образце (тонкой пластине толщиной h) принимает вид

$$a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (5)$$

с краевыми условиями

$$t(x, 0) = t_0; \quad \partial t / \partial x(h, \tau) = 0; \quad -\lambda \partial t / \partial x(0, \tau) = S_0 \exp(-\Psi\tau), \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности глинистого материала; a – коэффициент температуропроводности глинистого материала.

Готового решения с расчетными номограммами в такой постановке в научно-технической литературе найти не удалось. Однако по аналогии с приведенным в [4] можно полагать, что оно будет достаточно сложным и мало удобным для расчетов. Поэтому была проанализирована возможность использования готового решения задачи с граничным условием — $-\lambda \partial t / \partial x(o, \tau) = S_o / \sqrt{\tau}$, приведенного в [5] виде

$$t = t_o + \frac{S_o \sqrt{a}}{\lambda} \Gamma \left(\frac{1}{2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{erfc} [2n - 2 + \eta] + \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2\sqrt{Fo}} (2n - \eta) \right] \right\}, \quad (7)$$

где Γ — гамма-функция Эйлера; F_o — температурный критерий Фурье; $\eta = x/h$

Как показал анализ номограмм, приведенных в [4], выражение

$$\Theta = \Gamma \left(\frac{1}{2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2\sqrt{Fo}} (2n - 2 + \eta) \right] + \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2\sqrt{Fo}} (2n - \eta) \right] \right\}, \quad (8)$$

при $x = 0$ ($\eta = 0$, соответствует нагреваемой поверхности образца) в пределах $0,1 \leq Fo \leq 1,0$ с достаточной для практических расчетов точностью ($\pm 1\%$) можно аппроксимировать линейной зависимостью (рис. 1 линия 1) вида

$$\Theta = 1,6 + 0,7Fo, \quad (9)$$

а при $x = h$ ($\eta = 1$), что соответствует «холодной» поверхности образца в пределах $0,1 \leq Fo \leq 0,5$ с достаточной точностью ($\pm 2\%$) можно аппроксимировать линейной зависимостью (рис. 1 линия 2) вида

$$\Theta = -0,2 + 2,8Fo. \quad (10)$$

Тогда при $0,1 \leq Fo \leq 0,5$, т. е. в период достижения максимальной величины среднего градиента температуры по толщине образца и, следовательно, максимальной величины термоградиентного потока влаги

$$t_n - t_h = \frac{S_o \sqrt{a}}{\lambda} (1,8 - 2,1Fo). \quad (11)$$

Как видно из этой формулы, при $Fo \geq 0,1$, т. е. еще до установления регулярного теплового режима ($Fo > 0,2 - 0,3$), перепад температур (средний градиент температуры) начинает неуклонно уменьшаться, что свидетельствует об уменьшении роли термоградиентного переноса влаги в процессе трещинообразования. Следовательно, опасность образования поверхностных трещин за счет термоградиентного переноса влаги при испытании образцов гли-

нистых масс по ускоренной методике А. Ф. Чижского реализуется при $F_0 \leq 0,1$, что особенно характерна для высокочувствительных к сушке глин. При этом образование поверхностных трещин только за счет термоградиентного обезвоживания поверхностного слоя должно происходить в течение $\tau \leq 0,1h^2/a$, что для обычных кирпичных глин при $a = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ и $h = 1-1,6 \text{ см}$ (в соответствии с методикой А. Ф. Чижского) составляет $\tau \approx 17-43 \text{ с}$. Такое время образования поверхностных трещин характерно для глинистых масс обладающих высокой чувствительностью к сушке. В течение этого времени облучения образца даже мощным тепловым потоком процессы испарения влаги с поверхности имеют второстепенное значение. При образовании трещин на поверхности образцов среднечувствительных глин ($\tau \geq 80 \text{ с}$) обезвоживание за счет испарения влаги с поверхности может играть существенную роль.

Испытание чувствительности глинистой массы к сушке, используемой для производства кирпича на Минском заводе строительных материалов (80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева), по методике А. Ф. Чижского показали, что при толщине образцов $h = 1 \text{ см}$ образование поверхностных трещин происходит при $F_0 \approx 0,4-0,7$, а при $h = 3 \text{ см}$ — при $F_0 \approx 0,05-0,1$. Отсюда видно, что при $h = 3 \text{ см}$ процесс термоградиентного переноса влаги в данной глиняной массе, относящейся к среднему классу чувствительности к сушке и прошедшей обработку в вакуум-прессе, играют значительную роль. При $h = 1 \text{ см}$ в аналогичных условиях ($S_0 \approx 1 \text{ Вт}/\text{см}^2$) значения $F_0 \approx 0,4-0,7$, что свидетельствует о незначительной роли процесса термоградиентного массопереноса и основного влияния обезвоживания поверхностных слоев образцов за счет испарения влаги.

Относительно численного соответствия использования граничного условия $-\lambda \partial t / \partial x(0, \tau) = S_0 / \sqrt{\tau}$ и $-\lambda \partial t / \partial x(0, \tau) = S_0 \exp(-\psi \tau)$ необходимо отметить следующее. При $\tau \rightarrow 0$ зависимость $S_0 / \sqrt{\tau} \rightarrow \infty$, а $S_0 \exp(-\psi \tau) \rightarrow S_0$, поэтому вблизи нуля эти граничные условия сильно отличаются. При этом численное значение $S_0 / \sqrt{\tau}$ сильно зависит от выбранного масштаба времени. Например, в случае измерения времени в секундах при $\tau = 1 \text{ с}$ $S_0 / \sqrt{\tau} = S_0$, а в минутах — $S_0 / \sqrt{0,0167} = 7,8 S_0$, что несовместимо. В случае экспоненциальной зависимости кривая $S_0 \exp(-\psi \tau)$ плавно падает от S_0 до 0. При минутном масштабе времени через 1 мин. после начала облучения $S = S_0$, а при $\tau < 1 \text{ мин.}$ $S > S_0$, что также нереально. Поэтому расчет по зависимости $S = S_0 / \sqrt{\tau}$ должен начинаться с 1 принятого масштаба времени. Здесь наглядно проявляется ущербность использования обычных параболических дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии на которую указывал А. В. Лыков [6], предлагая взамен использовать гипербо-

лические дифференциальные уравнения с дополнительным членом, учитывающим период релаксации теплопереноса. Однако решение таких уравнений гораздо сложнее, а практическое применение еще проблематичнее из-за необходимости учета скорости распространения тепла и массы.

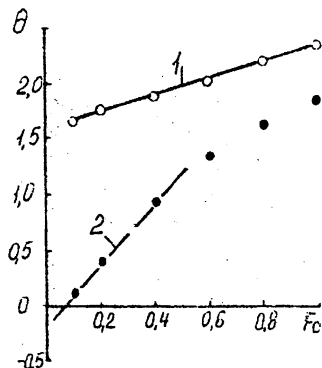


Рис. 1. Зависимость температурного параметра от величины критерия Фурье: 1 — (○) при $h = 0$ (нагреваемая поверхность плоского образца); 1 — (●) при $h = 1$ (тыльная поверхность плоского образца)

Как показывает сравнение расчетных величин роста относительного по сравнению с максимальной интенсивности испарения влаги (j/j_m) с экспериментальными при $S_0 \approx 0,7 - 1,0$ Вт/см, полученными А. Ф. Чижским [1] для образцов толщиной 1,6 см из спондиловой глины и нами для образцов толщиной 3 см из формовочной массы Минского завода строительных материалов, при секундном масштабе времени расчетная зависимость $j/j_m = f(\tau)$ примерно до 100 с проходит значительно выше данных А. Ф. Чижского и до 150 с выше наших. При минутном масштабе времени расчетная кривая проходит значительно ниже экспериментальных для $S_0 \approx 0,7 \times 1,0$ Вт/см² и начинается с 60 с (1 мин), а не с нуля. Однако при для $S_0 \approx 0,7 \times 1,0$ Вт/см² и начинается с 60 с (1 мин), а не с нуля. Однако при $S_0 \approx 0,25$ Вт/см² экспериментальные точки для глиняной пластинки из лукомльской глины (80%) с гранитным отсеком (20%) располагаются вблизи от расчетной кривой $S = S_0 / \sqrt{\tau}$ при минутном масштабе времени. Во всех случаях кривизна экспериментальных и расчетных кривых направлена согласовано. С уменьшением интенсивности облучения образца появляется начальный промежуток времени, в течение которого испарение влаги практически незаметно в течение 1 или даже нескольких минут, что давно отмечено некоторыми исследователями. В этих условиях трещинообразование может происходить только за счет термоградиентного влагопереноса.

Как видно из представленных результатов исследований, ускоренная методика определения чувствительности пластических керамических масс к сушке не позволяет учитывать реальное влияние толщины образца. С увеличением интенсивности теплового потока происходит резкий рост испарения влаги с поверхности образца, а трещинообразование, особенно у глинистых масс со средней и малой чувствительностью к сушке, происходит в основном не за счет термоградиентного переноса влаги, роль которого также возрастает с увеличением толщины образцов. В практическом плане это означает необходимость учета влияния различных теплофизических процессов (обезвоживание за счет испарения влаги с поверхности образца и термоградиентного переноса), которые при использовании ускоренной методики А. Ф. Чижского оценки чувствительности формовочной массы к сушке действуют в иные временные периоды по сравнению с производственной сушкой. Поэтому ускоренная методика А. Ф. Чижского нуждается либо в серьезной корректировке, либо необходимо разрабатывать новую методику оценки сушильных свойств глинистых масс.

Литература

1. Чижский А. Ф. Экспресс-метод определения чувствительности к сушке – М.: Стекло и керамика, 1966. – № 9. – С. 27–29.
2. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 328 с.
3. Чижский А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 177 с.
4. Ивановский И. К., Осипов С. Н. О термическом испытании чувствительности керамических масс к сушке // Вестник Белорусской государственной политехнической академии. – 2002. – № 3. – С. 13–15.
5. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчет теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
6. Лыков А. В. Теплообмен: Справ. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.