

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СУШКЕ ШАРО- И ДИСКООБРАЗНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ*

ИВАНОВСКИЙ И. К., докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Основным условием получения качественных изделий строительной керамики пластического формования является предотвращение появления любых трещин при сушке сырых изделий.

По месту появления и развития все трещины можно достаточно условно разделить на три вида: поверхностные, проникающие на небольшую глубину в керамическую массу (несколько мм); внутренние, не выходящие на поверхность изделия, и комбинированные, начинающиеся с поверхности и глубоко (до половины толщины или более) проникающие в керамическую массу.

Технологические причины появления трещин – подготовленные, например от свилей при формовании, и сушильные, образующиеся при неправильном выборе и использовании технологического режима сушки (температуры, влажности и скорости потоков сушильного агента).

Для оценки условий образования поверхностных трещин предложено около 20 методик определения чувствительности к сушке керамических масс пластического формования. Однако они дают весьма косвенные или условные характеристики, так как достаточно простой и представительной теории моделирования трещинообразования при сушке нет ввиду сложности и многообразия протекающих процессов. Эти методики предложены, в основном, для предотвращения наружных (поверхностных) трещин, различных видов короблений и даже разрушения изделий при сушке. Только М. С. Белопольский [1–4] теоретически и экспериментально пытался определить условия образования всех трех видов трещин при сушке круглых плиток из формовочных масс при тепломассообмене через образующие поверхности.

При изготовлении образцов автор [2] руководствовался следующей методикой: «Глина, высушенная и размолотая (размер частиц до 1 мм), замешивалась водой до образования нормальной рабочей консистенции. После трехсуточного вылеживания заготовленная валяшка несколько раз переминалась и из нее на поршневом прессе формовали цилиндры. Диски отрезали от цилиндра. Размер диска: диаметр – 40 мм, толщина – 4 мм. Для теплоизоляции торцы дисков слегка смазывали машинным маслом и покрывали станиолевыми дисками. При сушке в комнатных условиях на

* Публикуется в порядке обсуждения. – *Ред.*

станиолевые диски накладывали диски из текстолита. При сушке в сушильном шкафу между станиолевыми и текстолитовыми дисками помещали диски из асбеста».

В этих опытах применялись два способа сушки [2]: конвективная при комнатной температуре и влажности воздуха при его скорости 6...7 м/с (за счет обдувки образца настольным вентилятором) и сушка в сушильном шкафу в условиях естественной конвекции при различных значениях температур по сухому t_c и влажному t_m термометрам.

По мнению М. С. Белопольского [2], на величину критического перепада влагосодержаний способ сушки практически не влияет. Далее автор обосновывает целесообразность принятия величины средней влажности образца \bar{U} в момент образования трещины за условную границу отсчета критического перепада влажности между \bar{U} и влажностью поверхностного слоя $(\bar{U} - U_n)_{кр}$. При этом он предлагает сравнивать общие величины расчетных усадок в слое с влажностью от U_n до \bar{U} и от \bar{U} до центра круга U_c . Предполагается учет «не допущенных» усадок по сравнению со средней величиной влажности образца \bar{U} , образовавшихся к моменту появления трещины в результате сушки.

Приведенные рассуждения в аналитическом виде можно записать следующим образом. Допустим, к моменту появления трещины $\tau_{кр}$ распределение влажности, при условии изотропности всех физических свойств, описывается определенной функциональной зависимостью от r (текущий радиус диска радиусом R) в виде $\Delta U_r = (U_0 - U_r) = f(r)$.

Тогда с учетом равенства усадок площадей дискового образца $\Delta S_1 = \Delta S_2 = 0,5\Delta S$, где S – общая усадка площади диска в результате сушки.

Нетрудно убедиться, что $\Delta S = S_0(1 - \beta_s \Delta \bar{U})$, где β_s – коэффициент усадки площади образца при сушке (1/%), обычно принимаемый равным удвоенной величине линейного коэффициента усадки, а $\Delta \bar{U} = U_0 - \bar{U}$ – уменьшение средней влажности по сравнению с начальной.

Несколько сложнее определить расположение окружности средней влажности r_{cp} на диске. Для этого необходимо проинтегрировать уравнение, описывающее изменение усадки площади круга по обе стороны от линии средней влажности, которую условно можно назвать нейтральной линией, так как со стороны образующей окружности должны образовываться растягивающие напряжения, а со стороны центра – сжимающие напряжения.

Тогда, с учетом $S_r = \pi r^2$:

$$\int_0^r \beta_s \pi r^2 f(r) dr = \int_0^R \beta_s \pi r^2 f(r) dr.$$

Принимая $\beta_s = \text{const}$, получим

$$\int_0^r r^2 f(r) dr = \int_0^R r^2 f(r) dr.$$

Для числового примера определения положения линии средней влажности используем простейшую линейную зависимость $\Delta U_r = \Delta U_n r/R$ в относительной координате r/R , т. е. в долях от 1, как это показано на рис. 1, частично заимствованном у [2].

Тогда

$$\int_0^r \beta_s \pi \frac{\Delta U_n}{R} r^3 dr = \frac{1}{2} \Delta S_R = \frac{1}{2} \frac{1}{4} \beta_s \pi \Delta U_n R^3,$$

откуда $0,5R^4 = r^4$ и $r/R = \sqrt[4]{0,5} = 0,84$.

При вогнутой форме зависимости $\Delta U_r = f(r)$, что действительно имеет место при обычной сушке керамических изделий (за исключением индукционной сушки), положение линии средней влажности к образующей теплообменную поверхность окружности окажется еще ближе, где-то около $0,9R$. При $r = 20$ мм зона растяжения, по крайней мере в начальном периоде сушки круглого диска, будет представлять своеобразный обруч шириной 2...3 мм. Для шара при расчете аналогичным образом линия средней влажности должна находиться на расстоянии от центра $0,87R$.

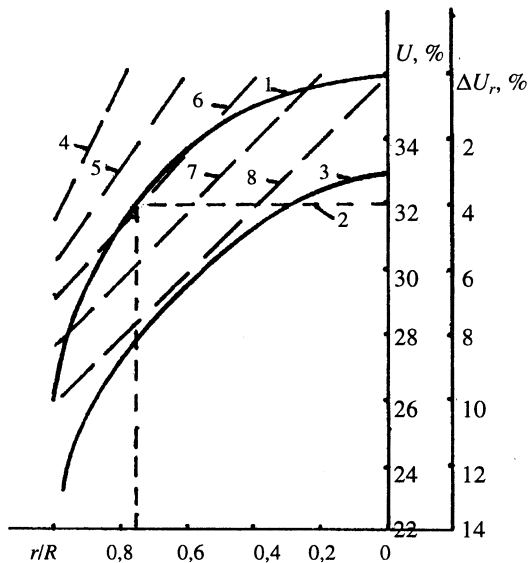


Рис. 1. Схема изменения влагосодержания в керамическом шаре при сушке: 1 – $U = f(r/R)$ к моменту окончания начального периода сушки; 2 – линия среднего влагосодержания по [2]; 3 – $U = f(r/R)$ к завершению процесса трещинообразования [2]; 4...8 – схематическое развитие поля влагосодержаний в начальном периоде сушки

Здесь необходимо определить, что понимается под «средним» влагосодержанием, например шара. У М. С. Белопольского (рис. 1, пунктирная линия 2) линия «среднего» влагосодержания шара пересекает кривую изменения влажности по радиусу образца в точке, соответствующей $r/R = 0,75$, что значительно отличается от полученного нами даже для линейного распределения влажности $r/R = 0,87$, но мало отличается от 0,71, получаемого в случае отсутствия учета свойства объема шара, который увеличивается пропорционально кубу радиуса. По-видимому, автор принимал «среднюю» линейную влажность, но усадка керамического шара охватывает его объем, а диска – его площадь.

Необходимо отметить, что исследование процессов трещинообразования на образцах круглой формы (тонкие диски при удалении влаги через боковую поверхность, шары) является удобным инструментом для подтверждения какой-либо конкретной идеи. Так, на примере прогрева глиняного шара в атмосфере со 100%-й относительной влажностью при отсутствии испарения влаги А. В. Лыков продемонстрировал трещинообразование под действием открытого им явления термоградиентного переноса [5].

В случае достаточно интенсивной сушки образцов глин в виде тонких дисков в сушильном шкафу при $t_c = 100$ °С и $t_m = 42$ °С у боковой теплообменной поверхности происходит интенсивное обезвоживание материала и соответственно его интенсивная усадка, что вызывает быстрый рост растягивающих напряжений. Здесь также уместно вспомнить результаты классических исследований П. Д. Лебедева [5]: «...как показали наблюдения, у поверхности образуется прочная сухая корка толщиной (в зависимости от режима сушки) от 3 до 8 мм, причем эта корка зачастую отделялась трещиной от других глубинных слоев».

Заметим, что П. Д. Лебедев проводил эксперименты с плоскими прямоугольными образцами из нижнекотловской глины толщиной 35...40 мм при односторонней радиационной и комбинированной сушке различной относительной интенсивности (0,045...0,165 %/мин при регулярном режиме). В экспериментах [4] с дорогинской, черняховской и приколотнянской глинами средняя относительная интенсивность сушки до появления поверхностных и внутренних трещин составляла 0,4...0,54 %/мин, т. е. была значительно выше. Поэтому в опытах М. С. Белопольского также следовало ожидать формирования относительно сухой и достаточно хрупкой наружной оболочки (обруча) толщиной 2...3 мм.

Серьезным недостатком использования тонких дискообразных керамических масс для испытания их на чувствительность к сушке по методике [4] является полное отсутствие условий для их коробления и образования плоскостных трещин ввиду симметричности формы и тепловлагоизоляции торцевых поверхностей.

Развитие процесса сушки и трещинообразования в радиальном поперечном сечении шарообразного образца по этой методике при отсутствии учета термоградиентного переноса влаги, что вполне допустимо при $U > 30$ %, схематически нам представляется следующим образом (рис. 1, пунктирные прямые 4...8).

В самом начале сушки происходит интенсивное обезвоживание поверхностного слоя (рис. 1, прямая 4), что связано как с максимальной площадью его поверхности, так и с высокими параметрами сушки ($t_c = 100\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 42\text{ }^\circ\text{C}$ либо комнатная температура и влажность воздуха при его скорости $6 \dots 7\text{ м/с}$). При этом зона уменьшения влажности материала в поперечном сечении тела увеличивается от поверхности к центральной части постепенно – с течением времени. Представления феноменологической теории тепломассопереноса, основанной на бесконечной скорости распространения теплоты и диффузии влаги, как убедительно показано в [7], являются весьма условными и для процессов сушки себя не оправдывают, ибо гиперболические уравнения тепломассопереноса и их решения указывают на четкие границы роста температуры и понижение влажности в начальном периоде сушки.

Поэтому наружная оболочка шара (обечайка диска) претерпевает усадку на основе весьма влажной керамической массы, модуль упругости которой при сжатии в закрытом объеме велик, т. е. эта масса практически не деформируется. Следовательно, целостность усыхающей оболочки зависит только от деформационных свойств керамической массы на растяжение и сдвиг.

Как показали исследования Л. А. Лепилкиной [8], по результатам которых на рис. 2 показано влияние влажности черемушкинской глины на ее предельно допустимую относительную деформацию при сдвиге (γ , %), при высокой влажности керамической массы последняя выдерживает значительные относительные деформации (до $3 \dots 4\%$), так как трещинообразование и разрушение происходят в упруго-пластичной области. Однако при потере нескольких процентов влаги ($3 \dots 5\%$), когда трещинообразование приближается к упругой области, предельно допустимая относительная деформация уменьшается до 1% , а в совершенно упругой области – даже до $0,5\%$.

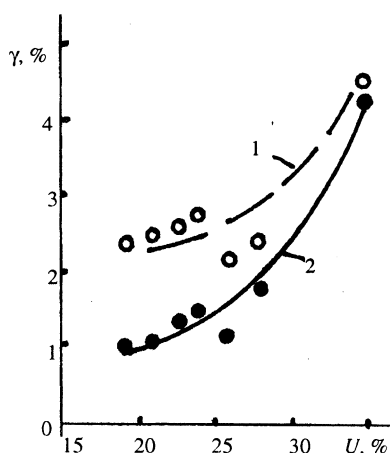


Рис. 2. Влияние влажности черемушкинской глины на предельно допустимую относительную деформацию: 1 – полное разрушение образца; 2 – трещинообразование

При наступлении предела допустимых деформаций растяжения на оболочке шара или обечайке диска появляется наружная трещина. Средняя влажность керамической массы шара или диска практически не играет роли, а все зависит от распределения влажности в поверхностном слое.

Как видно из фотографии трещины, приведенной в [2], она имеет радиальное направление, а длина достигает $0,5R$, что однако однозначно не свидетельствует о такой глубине зоны растягивающих напряжений, так как рост трещин всегда влечет за собой перестройку полей напряжений на значительной площади (объеме).

Таким образом, в результате образования первичной наружной трещины происходит значительная разгрузка наружной оболочки от растягивающих напряжений, а ее керамическая масса вследствие обезвоживания приобретает достаточно высокую прочность.

На следующем этапе сушки в связи с обезвоживанием более глубоких слоев ($0,9 \dots 0,6R$) последние начинают интенсивно сжиматься, что приводит к закрытию поверхностной трещины, так как они сжимают оболочку (обечайку). Однако глубинная часть этой трещины в зоне интенсивной усадки ($0,5 \dots 0,8R$) может сохраняться до конца процесса.

Одновременно на другом радиусе на расстоянии около $0,1R$ от края зарождается и развивается новая чисто внутренняя трещина, которая в диаметральном направлении пронизывает все сечение (тело) образца, почти достигая его противоположных краев (до $0,95R$). Такое диаметральное направление образования и развития внутренней трещины вполне понятно, так как оно является линией минимальной площади разрыва.

При высокой начальной влажности образцов (дорогинская, черняховская и приколотнянская глины соответственно $U_0 = 36,9; 42,6$ и $45,15$ % [4]) образование поверхностных и внутренних трещин наблюдается при влажности поверхностного слоя на $9 \dots 10$ % больше влажности окончания процесса усадки U_y . При этом поверхностный слой обезвоживается на $11 \dots 19$ %.

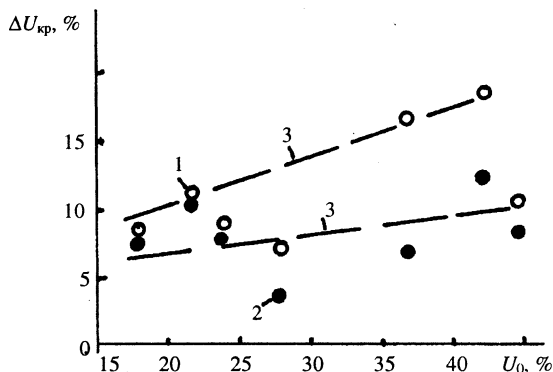
При невысокой начальной влажности (массы БЗ-2, ОКЗ и ККЗ соответственно $U_0 = 23,9; 18,3$ и $25,75$ %) и небольших значениях перепадов влажностей ($11,9; 8,3$ и $10,75$ %) к моменту образования поверхностных и внутренних трещин влажности поверхностных слоев в двух случаях из трех оказались только на $0,5 \dots 0,8$ % меньше границы окончания усадки.

Как показывает анализ приведенных в [4] результатов, с ростом перепада влажности, определяющего появление внутренних трещин $(\bar{U} - U_n)_{кр.в}$ в шести случаях из семи линейно уменьшается критический перепад влажности $(\bar{U} - U_n)_{кр.п}$, при котором образуются поверхностные трещины. Такие результаты могут быть увязаны только с методическими особенностями проведенных экспериментов, так как керамическая масса не может оказаться тем слабее снаружи, чем прочнее внутри.

Если по приведенным данным построить зависимость $\Delta U_{кр} = (U_0 - U_n) = f(U_0)$, которая представлена на рис. 3, то получается иная картина.

Значения $\Delta U_{кр}$ для поверхностных трещин уже не зависят от $\Delta U_{кр}$ для внутренних трещин, но всегда меньше, так как зарождению внутренних трещин по примененной методике экспериментов всегда предшествовало образование поверхностных трещин.

Рис. 3. Зависимость критического перепада влажности от начального по данным [4]: 1 – образование внутренних трещин; 2 – то же поверхностных трещин; 3 – границы зоны влияния начального влагосодержания на критические перепады влажности при образовании внутренних трещин



Для внутренних трещин характерна некоторая тенденция уменьшения $\Delta U_{кр}$, т. е. повышения чувствительности к сушке, с уменьшением U_0 .

При $U_0 < 25 \%$ при сушке многих керамических масс большое, а иногда и решающее значение начинают иметь процессы термоградиентного влагопереноса, которые способствуют трещинообразованию, особенно при высокой чувствительности к сушке.

ВЫВОД

Предложенная М. С. Белопольским [1–4] методика экспериментальных исследований и многочисленные существенные упрощения физической картины зарождения и развития трещин при сушке керамических образцов пластического формования слишком далеки от реальных производственных условий и поэтому не могут служить базой для разработки эффективного метода оценки чувствительности формовочных масс к сушке.

Однако повышение, по М. С. Белопольскому, чувствительности к сушке формовочных масс с уменьшением влажности во многих случаях находит подтверждение. Важно также установление верхней границы по времени образования трещин (массообменный критерий Фурье $Fo_m \leq 0,2$), что позволяет более четко определять продолжительность лабораторного эксперимента. Справедливо замечание, что превышение величины критического перепада влажности $(U_n - \bar{U})_{кр}$ на любом этапе сушки может привести к образованию внутренних трещин. Интересен вывод о несущественном влиянии способа сушки (конвективная, радиационная) на величину критического перепада влагосодержаний при образовании трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белополюский М. С. Кинетика объемно-напряженного состояния и растрескивание керамических изделий в процессе сушки // Тр. НИИСтройкерамика. – 1959. – Вып. 14. – С. 79–98.
2. Белополюский М. С. Механизм и критерии трещинообразования керамических изделий пластического формования при сушке // Там же. – 1961. – Вып. 18. – С. 3–23.
3. Белополюский М. С. Влияние начального влагосодержания на чувствительность глин к сушке // Там же. – 1966. – Вып. 26. – С. 79–84.
4. Белополюский М. С. Количественная оценка чувствительности глин к сушке // Стекло и керамика. – 1961. – № 12. – С. 12–17.
5. Лыков А. В. О термодиффузии влаги. – М.: ЖПХ, 1935. – Т. 8. – С. 19–54.
6. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – С. 92.
7. Лыков А. В. Тепломассообмен: Справ. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
8. Лепилкина Л. А. Причины растрескивания керамических масс в процессе сушки // Стекло и керамика. – 1956. – № 3. – С. 15–22.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 4.11.2002