Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 6. С. 269–276
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 6, pp. 269–276

Научная статья
УДК 539.3, 536.242

Развитие поверхностной микротрещины в сплошном стеклянном цилиндре при испытании его на термостойкость

В.А. Киричек✉

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Таганрог, Россия
✉*Zhornik_Victoria@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается развитие поверхностного микродефекта в сплошном стеклянном цилиндре неограниченной длины при его охлаждении. Микродефект моделируется плоской поперечной микротрещиной полукруглой формы с диаметром, расположенным на свободной от нагрузки поверхности цилиндра и полукруглым контуром, уходящим вглубь цилиндра.

Ключевые слова: сплошной цилиндр, микротрещина полукруглой формы, термостойкость, температурные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений

Для цитирования. Киричек В.А. Развитие поверхностной микротрещины в сплошном стеклянном цилиндре при испытании его на термостойкость // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 6. С. 269–276. URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=182451

Original article

Surface microcrack development in a solid glass cylinder during its thermal resistance test

V.A. Kirichek✉

Taganrog Institute Named after A.P. Chekhov (Branch) of Rostov State University of Economics (RSUE)), Taganrog, Russia
✉*Zhornik_Victoria@mail.ru*

Abstract. The development of a surface microdefect in a continuous glass cylinder of unlimited length during its cooling is considered. The microdefect is modeled by a flat transverse microcrack of semicircular shape with a diameter located on the load-free surface of the cylinder and a semicircular contour extending deep into the cylinder.

Keywords: solid cylinder, semicircular microcrack, thermal resistance, thermal stresses, stress intensity factor

For citation. Kirichek V.A. Surface microcrack development in a solid glass cylinder during its thermal resistance test. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 6, pp. 269–276. (In Russ.). URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=182451

Введение

Традиционно закономерности разрушения изучались исходя из механических нагрузок. Однако в последнее время большой интерес появился еще к температурным градиентам, когда из-за неравномерного распределения температуры в материале возникают температурные напряжения, также способные вызвать разрушение [1, 2].

В данной работе исследуется развитие поверхностных микротрещин в сплошных цилиндрах, в частности, связанное с оценкой термостойкости стекла в виде сплошных цилиндров [3, 4]. В этих работах проведен расчет термостойкости сплошных относительно длинных стеклянных цилиндров при наличии в них начальных поперечных кольцевых трещин, выходящих на свободную от нагрузок цилиндрическую поверхность. Однако начальные кольцевые трещины в цилиндрах при их испытании на термостойкость не существуют, а имеются поверхностные микродефекты, ориентированные произвольным образом, в том числе и плоские поперечные, хотя конечные трещины имеют кольцевую и близкую к ней форму [3].

Цель данной работы заключается в том, чтобы показать, каким образом из поверхностной плоской поперечной микротрещины в цилиндре при определенных условиях его охлаждения в начальные относительно короткие промежутки времени, развиваясь только вдоль поверхности цилиндра, образуются кольцевые и близкие к ним «начальные» трещины, которые в процессе дальнейшего охлаждения начинают расти и вглубь цилиндра по радиусу.

В работе [5] экспериментально исследовалась термостойкость относительно длинных стеклянных цилиндров и трубок с теплоизолированными торцами, что отвечало определению термостойкости новых марок электровакуумных стекол. При испытании на термостойкость на поверхности цилиндров вдали от торцов появлялись конечные винтовые трещины, близкие к кольцевым и кольцевые трещины, что говорило о радиальности температурного поля и об обобщенной плоской деформации вдали от торцов. В [5] для исследования термостойкости было взято двенадцать партий образцов по сто образцов в каждой партии с различными термомеханическими постоянными и различными размерами. Образцы в одиннадцати партиях имели такие постоянные, что минимальная начальная температура нагретого цилиндра T_0 оказалась выше 373 K – температуры пузырькового кипения охлаждающей воды, что вызвало резкое увеличение в 5–6 раз коэффициента теплообмена α между поверхностью цилиндра и водой [6, 7]. Только в одной партии (сплошные цилиндры) из ста образцов пять из них имели минимальную техническую прочность σ = 37 $МПа$, которая определяла минимальную их термостойкость. Поэтому при испытании на термостойкость таких цилиндров оказалось, что начальная температура их $T_0 \sim 378$ K немного выше 373 K – температуры начала пузырькового кипения. Это привело к снижению коэффициента теплообмена, а следовательно, и к несколько другому механизму развития поверхностных микродефектов, в частности, плоской поперечной микротрещины, выходящей на поверхность цилиндра. Развитие этой микротрещины под действием осевых температурных напряжений при охлаждении цилиндра рассматривается в данной работе.

Постановка задачи

На поверхности стеклянного цилиндра радиуса r_c относительно большой длины $\ell >> r_c$ имеется микродефект. Он для примера моделируется плоской поперечной микротрещиной полукруглой формы с диаметром, расположенным на свободной от нагрузки поверхности цилиндра и своим полукруглым контуром радиуса $r_к$, уходящим вглубь цилиндра. Начальная температура нагретого цилиндра T_0, а поверхность цилиндра обменивается теплом со средой (водой) постоянной температуры $T_c = 293$ $K < T_0$ с коэффициентом теплообмена α_0. Торцы цилиндра теплоизолированы, поэтому его температурное поле радиально и микротрещина не оказывает влияния на температурное поле. Под действием осевых температурных напряжений, вызванных радиальным температурным полем, микротрещина начинает развиваться.

Решение задачи

Для исследования поведения микротрещины в стеклянном цилиндре под действием осевых температурных напряжений использовались следующие термомеханические и геометрические постоянные цилиндра: теплопроводность стекла $\lambda_т = 0{,}5852$ $Вт/м^2К$; модуль упругости $E = 5{,}88\times10^4$ $МПа$; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}23$; относительно большой коэффициент термического расширения $\alpha_т = 87\times10^{-7}$ 1/К, радиус цилиндра $r_c = 2{,}15\times10^{-3}$ $м$, длина цилиндра $\ell = 4\times10^{-2}$ $м >> r_c$ относительно малая минимальная техническая прочность на растяжение при чистом изгибе 37 $МПа < \sigma <$ 107 $МПа$. На основании этих данных, используя теорию трещин в [3, 4], показано, что максимальная глубина начальных поверхностных микротрещин $\ell_1 = 54\times10^{-6}$ $м$, а минимальная $\ell_2 = 6\times10^{-6}$ $м$ и поэтому было принято, что $r_k = 54\times10^{-6}$ $м$ (максимальная глубина начальной поверхностной микротрещины).

Для расчета очень сложного коэффициента теплообмена α_0 между поверхностью цилиндра и охлаждающей его водой использовалось экспериментальное среднее значение термостойкости стеклянных трубок $r_c = 2{,}15\times10^{-3}$ $м$ и толщины стенки $\delta = 0{,}8\times10^{-3}$ $м$. Причем это среднее экспериментальное значение термостойкости оказалось равным $T_0 - T_c = 155K$ из числа образцов $n = 230$ с нормальным распределением и разбросом от минимальной термостойкости 110 $К$ ($T_{0\,min} = 403$ $К$, или 130°$С$) до 200 $К$ ($T_{0\,max} = 493$ $К$, или 220°$С$) которые совпали с расчетными средними значениями термостойкости [5] при $\alpha_0 = 24{,}5\times10^3$ $Вт/м^2К$. Это значение коэффициента теплообмена хорошо согласуется со значением $\alpha_0 = 27\times10^3$ $Вт/м^2К$, полученным в работе [6] при пузырьковом кипении воды, которое имеет место в вышеуказанном интервале начальных температур поверхности цилиндров (130°$С$ – 220°$С$). Для данного изложения нужно отметить, что при начальной температуре образцов T_0 даже незначительно меньшей 373 $К$ (100°$С$) α_0 резко снижается в 5–6 раз [6, 7], так как исчезает пузырьковое кипение.

Используя приведенные постоянные, находился критерий Био, характеризующий интенсивность теплообмена $Bi = \alpha_0 r_c / \lambda_т = 90$. В процессе резкого охлаждения цилиндра с поверхностной микротрещиной (испытание на термостойкость) в начальный относительно небольшой промежуток времени охлаждается только некоторый поверхностный слой цилиндра толщины d, а остальная часть имеет температуру T_0. Полагая $d = 4r_k = 0{,}216\times10^{-3}$ $м$, определим радиус r_d окружности внутри цилиндра, которая расположена на расстоянии d от поверхности цилиндра $r_d = r_c - d = 1{,}934\times10^{-3}$ $м$, и поэтому $r_d / r_c = 0{,}9$. Расчеты, выполненные, в частности, в работе [5] показывают, что при таких условиях охлаждения цилиндра при испытании на термостойкость ($Bi = 90$) внутри цилиндра на цилиндрической поверхности $r_d / r_c = 0{,}9$ действуют сжимающие радиальные напряжения, максимальная величина которых во времени менее 7 % от максимальных значений растягивающих осевых напряжений.

Для дальнейшего исследования необходима зависимость безразмерной температуры в цилиндре $\theta(r,t) = \dfrac{T_0 - T(r,t)}{T_0 - T_c}$ от безразмерного времени $F_s = at/d^2$ (критерий Фурье), полученная в [8, 9], где $a = \lambda_т/\rho c$ температуропроводность материала стекла, ρ – его плотность; c – удельная теплоемкость. В данной работе проведен расчет температуры от времени, на поверхности цилиндра $r/r_c = 1$ и на глубине $r/r_c = 0{,}9$ для $Bi = 90$.

Графики зависимости этих температур $\theta(r,t)$ от F_0 приведены на рис. 1.

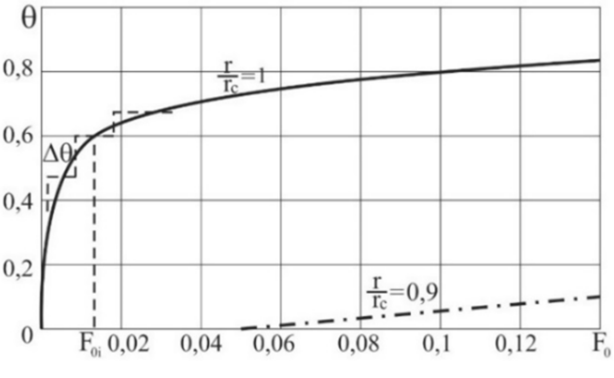

Рис. 1. Зависимости относительной температуры $\theta(r, F_0)$ от F_0 на поверхности цилиндра (сплошная линия ($r/r_c = 1$) и внутри цилиндра на расстоянии d от поверхности цилиндра (штрих-пунктирная линия ($r/r_c = 0{,}9$)

Как видно из рис. 1, относительная температура $\theta(r_d, F_0)$ равна нулю до 0,05, т.е. $T(r_d, F_0) = T_0$ до $F_0 = 0{,}05$.

Если пренебречь относительно малыми сжимающими радиальными напряжениями на глубине $r/r_c = 0{,}9$, то поверхностный слой цилиндра толщины $d = 0{,}216\times10^{-3}$ *м* можно представить пластиной толщины d с постоянной начальной температурой T_0, поверхности которой свободны от нагрузок. Одна из них ($r = r_c$), на которой расположен диаметр полукруглой поперечной микротрещины, имеет изменяющуюся во времени температуру $T(r_c,F_0)$, а другая ($r = r_d$) поддерживается при постоянной температуре T_0 (рис. 2).

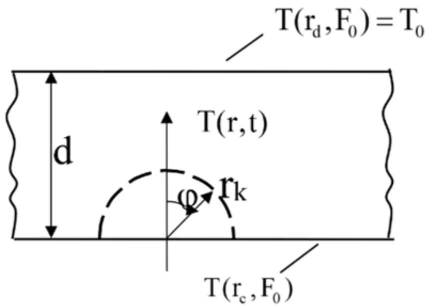

Рис. 2. Пластина с полукруглой микротрещиной на одной поверхности которой задана температура $T(r_c,F_0)$, на другой – температура T_0.

При уменьшении температуры пластины на T_0 напряженное состояние ее останется неизменным, начальная температура пластины станет равной нулю, температура на «контакте» ($r = r_d$) при $F_0 \le 0{,}05$ также станет равной нулю, а температура поверхности пластины с микротрещиной ($r = r_c$) будет изменяться со временем как $T(r_c, F_0) - T_0 = -\theta(r_c, Fo)(T_0 - T_c)$ (рис. 3).

Рис. 3. Пластина с полукруглой микротрещиной, на одной поверхности которой задана температура $T(r_c, F_0) - T_0$ на другой – нулевая температура.

Для этого случая, но при температуре поверхности пластины с полукруглой трещиной ($r = r_c$), равной (–1), решение для коэффициента интенсивности напряжений (КИН) $K_I^{(-1)}(F_0)$ было получено в работе [10] численно-аналитическим методом и имеет вид:

$$K_I^{(-1)}(F_0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{\alpha_T E}{(1-\nu)}\sqrt{r_k}\times1\times\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right), \quad (1)$$

или в безразмерном виде

$$\frac{K_I^{(-1)}(F_0)(1-\nu)\sqrt{\pi}}{2\alpha_T E\sqrt{r_k}} = 1\times\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right), \quad (2)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; α_T – коэффициент термического расширения материала пластины.

Функция $\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right)$, полученная в [10], записанная в несколько иной форме, имеет вид:

$$\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right) =$$

$$= \Psi_0\left[(1+\frac{3}{2}F_0)erf\left(\frac{1}{\sqrt{F_0}}\right) - \right.$$

$$\left. -\frac{\sqrt{F_0}}{\sqrt{\pi}}\left(4 - e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{F_0}}\right)^2}\right)\right] + \Psi_1 3\frac{r_k}{d}\sqrt{F_0}\times \quad (3)$$

$$\times\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{2}\sqrt{F_0}\cdot erf\left(\frac{1}{\sqrt{F_0}}\right)\right] - \Psi_2.$$

Рассчитаем $\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right)$ по (3), воспользовавшись числовыми значениями для Ψ_0, Ψ_1, Ψ_2, приведенными в [10], при $\frac{r_k}{d} = 0{,}25$. Нужно заметить, что приведенные данные в [11], взятые из [10], содержат неточности. На рис. 4 приведены графики зависимости $\Psi\left(F_0,\varphi,\frac{r_k}{d}\right)$ от F_0

при различных значениях угла $\beta = \frac{\varphi}{\pi/2}$, где φ – угол, отсчитываемый по контуру трещины от максимального углубления.

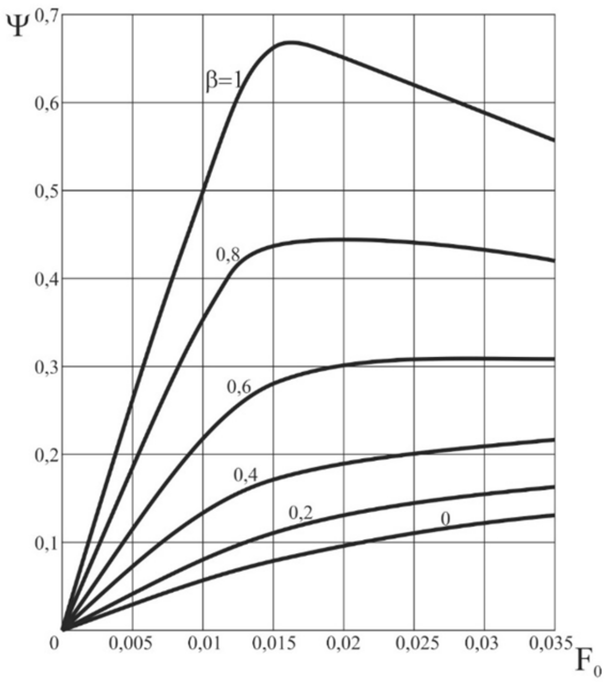

Рис. 4. Зависимость Ψ от времени F_0 при различных углах β на контуре микротрещины

Определим КИН $K_I^{(-\Delta)}(F_0 - \eta)$ для случая, когда на поверхности с изменяющейся во времени температурой появляется элемент ступенчатой температуры

$$\Delta = \partial\left[T_0 - T(r_c, F_0)\right]$$

в момент времени $F_0 = \eta$. Тогда по аналогии с (1)

$$\partial K_I^{(-\Delta)}(F_0 - \eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{\alpha E}{1-\nu}\sqrt{r_k} \times \\ \times \partial\left[T_0 - T(r_c, \eta)\right]\Psi\left(F_0 - \eta, \varphi, \frac{r_k}{d}\right). \tag{4}$$

С учетом введенного обозначения относительно температуры θ

$$\partial K_I^{(-\Delta)}(F_0 - \eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{\alpha_T E}{1-\nu}(T_0 - T_c)\sqrt{r_k} \times \\ \times \partial\theta(\eta)\Psi\left(F_0 - \eta, \varphi, \frac{r_k}{d}\right), \tag{5}$$

где ∂ – знак бесконечно малого приращения; $\theta(r_c, \eta) = \theta(\eta)$.

Запишем в безразмерном виде приращение КИН

$$\partial\frac{K_I^{(-\Delta)}(F_0 - \eta)(1-\nu)\sqrt{\pi}}{2\sqrt{r_k}\alpha_T E(T_0 - T_c)} = \\ = \Psi\left(F_0 - \eta, \varphi, \frac{r_k}{d}\right)\partial\theta(\eta) = dK_I^*(F_0, \eta). \tag{6}$$

Рассчитаем по (6) КИН K_I^* в безразмерном виде при температуре поверхности пластины с трещиной $(r = r_c)$, равной $T(r_c, F_0) - T_0 = = -(T_0 - T(r_c, F_0))$, используя принцип суперпозиции (теорему Дюамеля)

$$K_I^*(F_0) = \frac{K_I(F_0)(1-\nu)\sqrt{\pi}}{2\alpha_T E\sqrt{r_k}(T_0 - T_c)} = \\ = \int_0^{F_0}\Psi(F_0 - \eta)\frac{\partial\theta(\eta)}{\partial\eta}d\eta. \tag{7}$$

Эта формула позволяет приближенно вычислить $K_I^*(F_0)$, если $\theta(F_0)$ аппроксимировать ступенчатой функцией

$$\theta(F_0) = \sum_{i=1}^{n}\Delta\theta_i H(F_0 - F_{0i}), \tag{8}$$

где $H(t)$ – функция Хевисайда, равная 1, если $t > 0$ и 0, если $t < 0$.

Подставив (8) в (7), получим окончательную формулу для расчета КИН:

$$K_I^*(F_0) = \sum_{i=1}^{n}\Delta\theta_i\Psi(F_0 - F_{0i}). \tag{9}$$

Вычислим приближенно K_I^* по формуле (9). Для этого функцию $\theta(F_0)$, изображенную на рис. 1, представим в виде ступенчатой функции, рассчитанной по формуле (8) (штриховая линия на рис. 1). Используя графические зависимости $\Psi(F_0, \varphi, r_c/d)$, приведенные на рис. 4 по (9), определим изменения $K_I^*(F_0)$ во времени F_0 в различных точках контура трещины φ. Графики зависимости K_I^* от F_0 для различных φ при $r_k/d = 0,25$ приведены на рис. 5.

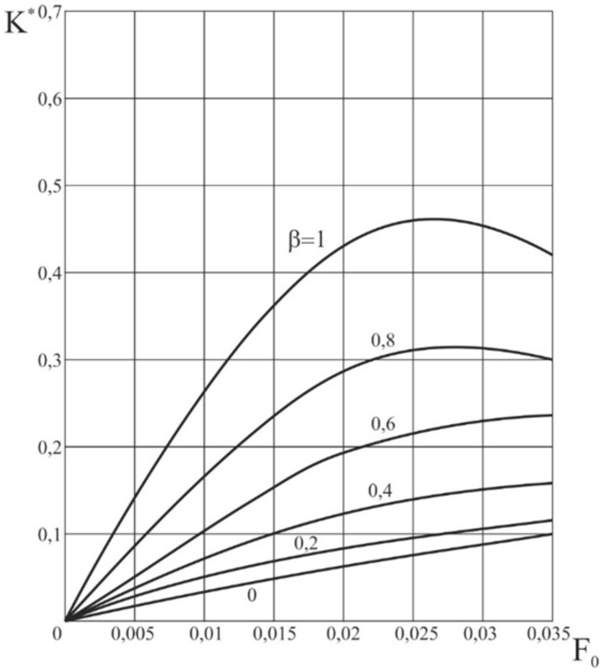

Рис. 5. Зависимость K_I^* от времени F_0 при различных углах β на контуре микротрещины

Из рис. 5 видно, что КИН K_I^* положителен, зависит от времени с максимумом и изменяется по контуру трещины. Причем на поверхности пластины в двух точках $\left(\beta = 1,\, \varphi = \dfrac{\pi}{2}\right)$ K_I^* наибольший. Это означает, что если K_I^* в этих двух точках достигает максимума во времени и при этом $\left|K_I^*(Fo)\right|_{max} = K_{IC}^*$, $K_{IC}^* = \dfrac{K_{IC}(1-\nu)\sqrt{\pi}}{2\alpha_T E\sqrt{r_k}\,(T_0 - T_c)}$, где K_{IC} – вязкость разрушения материала, то разрушение начинается на поверхности пластины вдоль нее, но по радиусу микротрещина не растет и контур трещины из полуокружности вытягивается в полуэллипс, а далее – в окружность, охватывающую цилиндр. Так, для начальной поверхностной полукруглой микротрещины глубины (радиуса) $r_k = 54 \times 10^6\, м$ КИН $K_I^*(Fo)$ на поверхности β = 1 достигает максимума ~ 0,46 в момент времени $Fo = 0{,}025$, в то время как на глубине β = 0 в этот момент времени $K_I^*(Fo) \sim 0{,}074$, то есть КИН на поверхности пластины в 6,2 раза больше, чем на глубине.

При изотермическом однородном растяжении такого же слоя с такой же полукруглой поверхностной микротрещиной [11] КИН при β = 1 также выше КИН при β = 0 за счет того, что точки β = 1 находятся на свободной от нагрузки поверхности, тогда как точка β = 0 находится в глубине. Однако увеличение КИН при β = 1 выше КИН при β = 0 всего в 1,26 раза, что вызывает устойчивый рост полукруглой микротрещины на свободной от нагрузки поверхности (рост диаметра микротрещины) с не изменяющейся меньшей полуосью, равной r_k. Однако при отношении полуосей эллипса $\sim 2/3$ КИН по контуру выравнивается за счет изменения формы микротрещины и однородности внешней нагрузки [10, 11]. Сравнение влияния на КИН температурных напряжений и однородных (механических) напряжений показывает насколько велики температурные напряжения на поверхности слоя с микротрещиной (β = 1), способные вызвать рост микротрещины в длину вдоль поверхности в отличие от температурных напряжений на глубине (β = 0), не способных вызвать рост микротрещины вглубь. Это связано с изменяющимся по толщине слоя температурным полем (радиальным температурным полем в цилиндре), имеющим максимальный температурный градиент на охлаждаемой поверхности. Поэтому в случае с температурными напряжениями выравнивания КИН при форме эллипса $2/3$, как в однородном поле растяжения, не происходит, так как КИН на поверхности (β = 1) приблизительно в пять-шесть раз выше, чем на глубине (β = 0). Это вызывает предварительное подрастание микротрещины в длину вдоль поверхности цилиндра без роста вглубь по радиусу.

Такое подрастание поверхностной микротрещины в длину по поверхности цилиндра при отсутствии роста вглубь наблюдалось экспериментально в [5].

Как говорилось во введении, при испытании на термостойкость цилиндров из двенадцати партий в одной из них (термомеханические постоянные и размеры, приведенные во введении) в пяти стеклянных цилиндрах из ста с σ = 37 *МПа* начальная температура T_0 оказалась немного больше 373 *К* $(\sim 378\ К)$, то есть на границе с пузырьковым кипением охлаждающей цилиндр воды. Поэтому при испытании на термостойкость этих цилиндров коэффициент теплообмена α_0 уменьшился, что привело к уменьшению градиента температур по радиусу в том числе и на поверхности цилиндра. Этого градиента согласно результатам, полученным в данной работе, хватило для подрастания микротрещины в длину по поверхности цилиндра при отсутствии роста вглубь.

При извлечении этих образцов из воды видны были мельчайшие трещины большой длины в основном винтовой близкой кольцевой и кольцевой формы. Однако в течение примерно четверти часа эти трещины как бы исчезали. «Исчезновение» таких мельчайших в глубину, но длинных трещин объясняется тем, что попавшая в трещину вода расклинивала их и трещины были видны. В течение четверти часа вода испарялась за счет внутренней еще горячей области цилиндра и трещина оказывалась невидимой. Поэтому эти образцы с «невидимыми» трещинами снова испытывались на тормостойкость, но уже с начальной температурой T_0 выше на 10 K (388 K) с охлаждением при пузырьковом кипении и $\alpha_0 = 24{,}5 \times 10^3$ $Вт/м^2 \times K$.

При охлаждении «исчезнувшие» трещины были уже видны как «проросшие» по радиусу. Поэтому в эксперименте минимальная термостойкость таких цилиндров отмечалась как 388 – 293 = 95 K (между 90 K и 100 K), что видно из рис. 6 (два левых крестика) (T_c = 293 K), приведенного в [5].

Рис. 6. Функция распределения экспериментальных значений термостойкости стеклянных цилиндров (крестики)

Такое же подрастание в длину по поверхности цилиндра происходило и для более мелких микротрещин, но при начальной температуре цилиндра T_0 выше 373 K (несколько дальше от границы пузырькового кипения) и поэтому охлаждение цилиндров проходило при $\alpha_0 = 24{,}5 \times 10^3$ $Вт/м^2 \times K$. Однако это подрастание микротрещин в длину вдоль поверхности цилиндров и превращение их в начальные подобные кольцевым или кольцевые трещины совершалось в начале процесса охлаждения, и в отличие от предыдущего случая дальнейший рост микротрещин по радиусу вглубь цилиндра проходил в течение этого же процесса охлаждения по мере развития градиентов температур.

Заключение

В работе рассмотрено развитие поперечной полукруглой микротрещины с диаметром, расположенным на поверхности нагретого стеклянного сплошного цилиндра и полукруглым контуром (фронт микротрещины) уходящим вглубь цилиндра при его охлаждении. Показано, что КИН с одним максимумом во времени зависит от точек на полукруглом контуре; имеет наибольшее значение в двух точках контура на поверхности цилиндра и наименьшее (более чем в 6 раз) в точке контура, наиболее удаленной от поверхности цилиндра (на расстоянии радиуса микротрещины). Поэтому прежде всего при достижении наибольшими КИН вязкости разрушения (трещиностойкости) стекла полукруглый контур вытягивается в полуэллипс и далее в кольцевую трещину (подрастает в длину), не меняя глубины. По мере дальнейшего развития градиентов температур начинается рост трещины в глубину (по радиусу). Проанализирован экспериментально наблюдаемый процесс подрастания микротрещины в длину вдоль поверхности стеклянного цилиндра без роста в глубину (по радиусу) при его испытания на термостойкость.

Список источников

1. **Удалов А.С., Звягин А.В.** Моделирование тел с трещинами при механических и тепловых воздействиях // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов. Т. 3. Санкт-Петербург, 2023. С. 718–720.
2. **Паушкин А.Г.** К вопросу об образовании температурных трещин в кирпичных стенах // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 173–176.
3. **Киричек В.А.** Термостойкость сплошных цилиндров из неорганического стекла // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 2. С. 85–96.

4. **Киричек В.А.** Развитие поверхностной кольцевой трещины в сплошном цилиндре при тепловом воздействии // Тепловые процессы в технике. 2022, Т. 14, № 5. С.195–208.
5. **Жорник А.И.** Поля температур и напряжений, возникающих в твердых телах цилиндрической формы при тепловых нестационарных воздействиях: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Москва, 1972. 201 с.
6. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
7. **Михеев М.А.** Основы теплопередачи. Москва: Госэнергоиздат, 1956.
8. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967. 599 с.
9. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. Москва: Высшая школа, 1985. 480 с.
10. **Smith F.W., Emery A.F., Kobajashi A.S.** Stress intensity factors for semicircular crack // Trans. ASME, ser. E.J. Appl. Mech. 1967. Vol. 34. No. 4. P. 953–958.
11. **Черепанов Г.П.** Механика хрупкого разрушения. Москва: Наука, 1974. 640 с.

References

1. **Udalov A.S., Zvyagin A.V.** Modelirovanie tel s treshhinami pri mexanicheskix i teplovy'x vozdejstviyax [Modelling of bodies with cracks under mechanical and thermal effects]. *XIII Vserossijskij s'ezd po teoreticheskoj i prikladnoj mexanike. Sb. tezisov dokladov*. Vol. 3. St. Petersburg, 2023, pp. 718–720.
2. **Paushkin A.G.** K voprosu ob obrazovanii temperaturny'x treshhin v kirpichny'x stenax [On the formation of temperature cracks in brick walls]. *Vestnik MGSU*, 2010, no. 4, pp. 173–176.
3. **Kirichek V.A.** Thermal stability of solid inorganic glass cylinders. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 85–96.
4. **Kirichek V.A.** Development of a surface annular crack in a solid cylinder under thermal action. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 195–208.
5. **Zhornik A.I.** Polya temperatur i napryazhenij, voznikayushhix v tverdyx telax cilindricheskoj formy pri teplovyx nestacionarnyx vozdejstviyax. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [Temperature and stress fields arising in cylindrical solid bodies under thermal unsteady actions]. Moscow, 1972, 201 p.
6. **Kutateladze S.S.** Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of heat transfer theory]. Novosibirsk: Nauka, 1970, 659 p.
7. **Mixeev M.A.** Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Gosenergoizdat, 1956.
8. **Lykov A.V.** Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p.
9. **Kartashov E.M.** Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyx tel. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 480 p.
10. **Smith F.W., Emery A.F., Kobajashi A.S.** Stress intensity factors for semicircular crack. *Trans. ASME, ser. E.J. Appl. Mech*, 1967, vol. 34, no. 4, pp. 953–958.
11. **Cherepanov G.P.** Mexanika xrupkogo razrusheniya [Brittle fracture mechanics]. Moscow: Nauka, 1974. 640 p.