

Анализ изломов керамических стержней при кратковременном и длительном изгибе

С. Г. Никольский

Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия

Анализ поверхностей изломов при кратковременном и длительном изгибе свидетельствует о возрастающей роли касательных напряжений при разрушении в условиях длительного нагружения. Установлено, что при разработке экспресс-методов прогнозирования долговечности целесообразно исследовать кинетику трещин сдвига, а не отрыва.

Ключевые слова: касательные напряжения, длительное нагружение, трещины сдвига.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы путем анализа характера изломов уточнить механизм разрушения в условиях длительного нагружения. Траектория излома хрупкого материала при кратковременном изгибе преимущественно совпадает [1] с касательной к площадкам с наибольшими растягивающими напряжениями. В связи с этим разрушение керамики при длительном нагружении также отождествляют [2] с развитием трещины отрыва, и для прогнозирования долговечности [3] используют уравнение скорости роста трещины

$$\dot{a} = AK_1^n,$$

где A и n – константы при заданных условиях испытаний; K_1 – коэффициент интенсивности напряжений трещины отрыва.

Однако экспериментальная проверка [4] такой методики прогнозирования показала, что значения n , определенные при испытаниях образцов с макротрещиной отрыва, более чем в два раза выше полученных по результатам кратковременных и длительных испытаний на изгиб образцов из того же материала без искусственных дефектов. Сопоставление данных исследований изломов керамических изделий при изгибе с акустической эмиссией в процессе разрушения при кратковременном нагружении [5, 6] свидетельствует, что разрушение около 80% изделий начинается с развития трещины сдвига в области нейтральной линии (НЛ) и завершается лишь отрывом. Справедливость этого вывода (или его уточнение) для длительного нагружения позволит обоснованно выбрать тип макротрещины для определения экспресс-методом констант кинетического уравнения. Полученные результаты могут быть использованы также для решения методических вопросов, в частности при планировании длительных испытаний на изгиб [7].

Методика испытаний. Изгиб образцов при $(20 \pm 4)^\circ\text{C}$ силой, сосредоточенной посередине пролета, или по схеме чистого изгиба (рис. 1) проводили [8–12] с помощью призм, ширина лезвий которых не превышала 0,2 мм. Учитывая, что увеличение размеров изделий облегчает фрактографический

анализ, четыре опорных стержневых изолятора с диаметром тела 100 мм доводили до разрушения за 21–46 дней при консольном изгибе. Силу, перпендикулярную оси изолятора, прикладывали к верхнему фланцу изолятора на расстоянии 1 мм от нижнего фланца (заделки) на разработанной ранее [13] установке и увеличивали на 500 Н каждые семь дней от 2000 до 4000 Н. Все четыре изолятора разрушились на границе заделки.

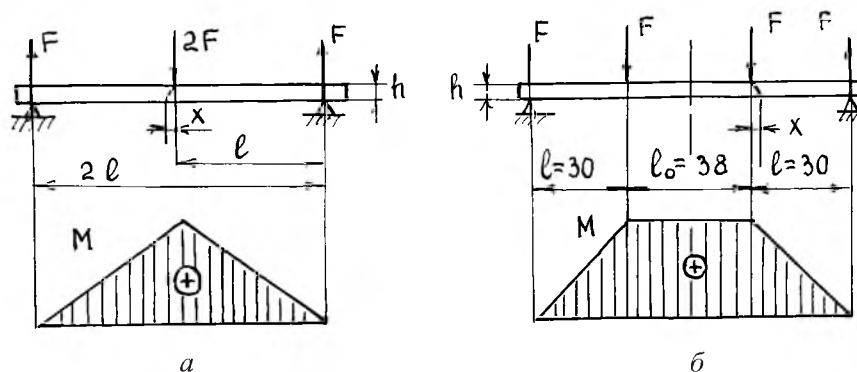


Рис. 1. Схемы нагружения и эпюры изгибающих моментов при трехточечном – *a* и четырехточечном (чистом) – *б* изгибе.

Полученные результаты сравнивали с данными, определенными при тангенциальном растяжении фарфоровых трубок [12] и ферритовых колец диаметром 16–18 мм и толщиной стенки 1–2 мм, которое проводили между шлифованными плоскостями по торцам образца внутренним давлением жидкости [14] через резиновую соску внутри образца. Перед длительными испытаниями для каждого образца неразрушающим акустико-эмиссионным способом [15] определяли пороговую нагрузку L_0 , без превышения которой дефект не развивался. При постоянном отношении $L/L_0 = 1,3$ время до разрушения образцов составляло от 3600 до 10000 с.

Результаты испытаний и их анализ. При изгибе образцов поверхность разрушения в зоне растяжения может отклоняться на случайную величину x от сечения с максимальным изгибающим моментом M (рис. 1). При разрушении 1050 фарфоровых стержней* диаметром 10,5 мм за 10...30 с силой, сосредоточенной посередине пролета (рис. 1, *a*) длиной 180 мм, дисперсия величины x оказалась равной $S_x^2 = 15,7 \text{ мм}^2$, дисперсия отношения x к длине l участка с переменным M ($l = 90 \text{ мм}$) – $S^2 = 19,4 \cdot 10^{-4}$. При испытании таких же стержней силой, сосредоточенной посередине пролета длиной 90 мм, получили $S_x^2 = 3 \text{ мм}^2$ и $S^2 = 18,8 \cdot 10^{-4}$. В обоих случаях результаты не противоречат гипотезе о нормальном распределении величины x с математическим ожиданием, равным нулю. С учетом объема эксперимента расхождение дисперсий $19,4 \cdot 10^{-4}$ и $18,8 \cdot 10^{-4}$ можно считать случайным, а S^2 равной $19 \cdot 10^{-4}$ независимо от значения l .

* При скорости нагружения $\dot{\sigma} = 3,4 \text{ МПа/с}$ среднее значение предела прочности $\bar{\sigma}_н = 77,5 \text{ МПа}$, дисперсия $S_{\bar{\sigma}_н}^2 = 22,4 \text{ МПа}^2$ [10].

При разрушении 862 ферритовых стержней* в результате нагружения за 10...50 с в условиях чистого изгиба (рис. 1,б) вероятность разрушения вне участка $l_0 = 38$ мм с $M = \text{const}$ составила 0,127, а $S^2 = 59 \cdot 10^{-4}$. При разрушении 400 таких же стержней за аналогичное время нагружения силой, сосредоточенной посередине пролета ($l = 49$ мм), получили распределение x/l , близкое к нормальному с $S^2 = 55 \cdot 10^{-4}$. Осредняя дисперсии, имеем $S^2 = 57 \cdot 10^{-4}$. Это значение в три раза выше, чем полученное для фарфоровых образцов. Таким образом, при кратковременных испытаниях дисперсия S^2 случайной величины x/l зависит от типа материала, но практически не зависит от схемы изгиба.

В случае изгиба сосредоточенной силой при переходе от кратковременного нагружения к длительному (время до разрушения образцов более 3600 с) дисперсия S^2 случайной величины x/l для фарфоровых стержней снизилось до $9,3 \cdot 10^{-4}$, для ферритовых – до $26 \cdot 10^{-4}$. Это приблизительно в два раза меньше значения S^2 , полученного в условиях кратковременного нагружения. При чистом изгибе указанные выше изменения в режимах нагружения приводят к переходу от практически равномерного распределения изломов на участке с $M = \text{const}$ к их резкой концентрации на границах этого же участка – до 35% общего числа изломов. Одновременно среди изломов в зоне приложения сосредоточенной силы увеличивается доля изломов со следами развития трещины от НЛ в зону растяжения (рис. 2) от 1 до 27...42%. Если после разрушения при длительном нагружении по поверхности излома в зоне бывшего растяжения постучать слегка керном вдоль оси стержня, то от поверхности излома часто отваливается лепесток материала, прикрывавший след развития трещины от НЛ. Такой “демаскирующий” прием на фарфоре приводит к повышению доли изломов со следами развития трещин от НЛ в зону растяжения до 42%, а для ферритовых стержней – до 27%. Различие между этими результатами связано, по-видимому, с тем, что на темных изломах феррита с межзеренным разрушением невозможно увидеть следы, показанные на рис. 2,а.

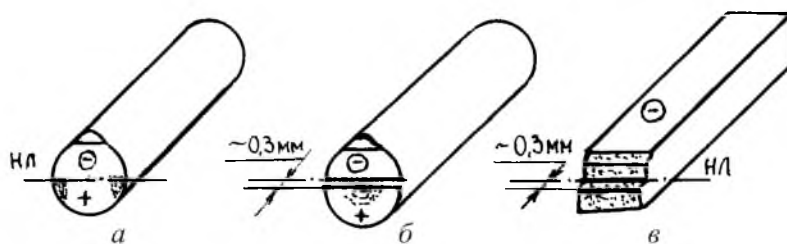


Рис. 2. Изломы в зоне приложения сосредоточенной силы со следами развития трещины от НЛ в зону растяжения (+): а – фарфоровый стержень со следами развития двух симметричных подповерхностных трещин; б – фарфоровый стержень со ступенькой на уровне НЛ от трещины, развивающейся около оси стержня; в – ферритовый стержень.

* Образцы длиной 101 мм прямоугольного сечения высотой $h = 6,4$ мм и шириной $b = 8,5$ мм. Среднее значение предела прочности $\bar{\sigma}_{и} = 64,4$ МПа при скорости нагружения $\dot{\sigma} = 12,5$ МПа/с; $S_{\sigma_{и}}^2 = 67,5$ МПа².

Рис. 3 иллюстрирует одну из двух частей цилиндрического хвостовика опорного изолятора, извлеченную из нижнего фланца (заделки) путем его распиловки после разрушения изолятора в условиях длительного нагружения. На поверхностях разрушения явно видно то, что не всегда просматривается на изломах мелких образцов: близкий к полукругу след развития трещины сдвига от НЛ* в зону растяжения, захватывающий значительную ее часть, и языковидный след в перпендикулярной плоскости, т.е. плоскости нейтрального слоя. Оба следа симметричны относительно плоскости нагружения, что свидетельствует о развитии трещины из области около оси изолятора, где она зарождается из-за значительных напряжений при охлаждении его после спекания. У одного из четырех изоляторов при разрушении на границе заделки образовался диск толщиной около 2 мм, прикрывавший трещины, показанные на рис. 3. При этом на изломе изолятора четко видны волны Вальнера, определяющие расположение дефекта, ответственного за разрушение отрывом, как при кратковременном нагружении аналогичных изоляторов [18] или стеклянных образцов [19].

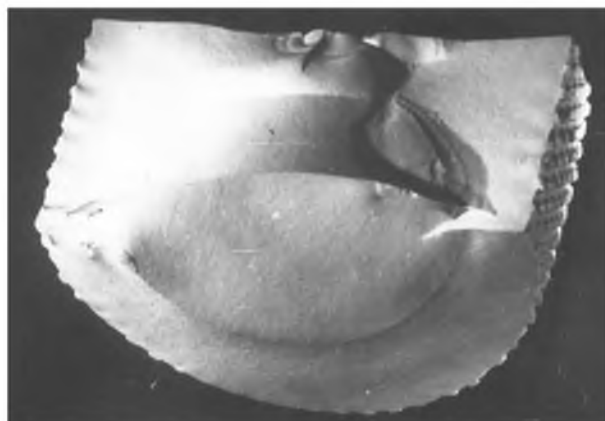


Рис. 3. Поверхности разрушения хвостовика стержневого изолятора при длительном консольном изгибе.

При длительном нагружении на участке с $M = \text{const}$ (чистый изгиб) у изломов в зоне растяжения появляется небольшая площадка, наклоненная под углом $40\text{--}50^\circ$ к оси стержня (на рис. 4 зачернена). Характер изломов при длительном нагружении (рис. 2–4) связан с возрастающей ролью касательных напряжений τ . Ранее [5, 6] с помощью акустической эмиссии доказано, что в изделии трещина сдвига, как правило, стартует раньше трещины отрыва, т.е. при значительно меньшей нагрузке; при этом развитие трещины сдвига происходит более вяло, чем трещины отрыва (рис. 5). При быстром нагружении до разрушения трещина сдвига не успевает заметно развиваться за время повышения нагрузки от $L_{0\Pi}$ до L_{0I} , и характер излома определяется развитием трещины отрыва. При длительном воздействии нагрузки $L < L_{0I}$,

* У электротехнического фарфора модуль Юнга при сжатии на 15% выше, чем при растяжении [16]. В связи с этим НЛ проходит не через центр тяжести сечения [17]. Площадь зоны растяжения на рис. 3 оказывается несколько больше площади зоны сжатия, которая на рисунке не показана.

но больше $L_{0\Pi}^*$, развитие трещины отрывом оказывается возможным лишь после того как в сечении, ослабленном развивавшейся трещиной сдвига, нормальное напряжение σ увеличится до порогового σ_{0I} , отвечающего L_{0I} и пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений $K_{0I} = Y\sigma_{0I}\sqrt{a}$, где a – длина трещины; Y – коэффициент, учитывающий соотношение размеров трещины и тела, ее ориентацию и другие особенности. Путем отрыва может развиваться как подросшая трещина сдвига, так и попавшие в область концентрации напряжений около ее вершины другие дефекты: трещина отрыва развивается с высокой скоростью параллельно трещине сдвига, которая оказывается закрытой тонким слоем материала.

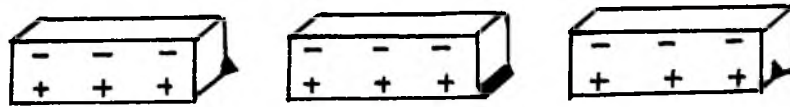


Рис. 4. Изломы при длительном разрушении на участке с постоянным изгибающим моментом: “+” – зона растяжения; “-” – зона сжатия.

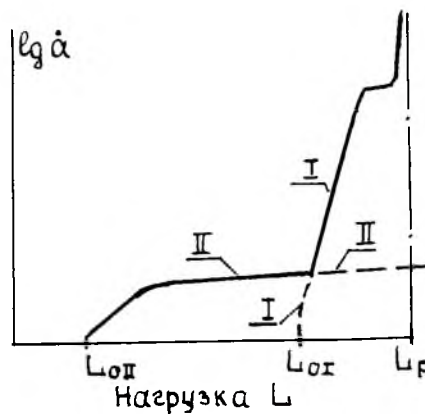


Рис. 5. Изменение скорости \dot{a} роста трещин отрыва (I) и сдвига (II) при монотонном нагружении керамического изделия: L_{0I} и $L_{0\Pi}$ – пороговая нагрузка L_0 соответственно для трещины отрыва и трещины сдвига; L_p – разрушающая нагрузка.

С учетом этого становится понятной причина расхождения значений n в зависимостях $\dot{a} = AK^n$, полученных в [4] для трещины отрыва и по результатам испытаний ферритовых стержней: при длительном воздействии нагрузки $L < L_{0I}$, но больше $L_{0\Pi}$, разрушение связано с развитием трещины сдвига и лишь завершается отрывом.

Концентрация изломов при длительном нагружении по схеме чистого изгиба в зонах приложения сосредоточенных сил свидетельствует о том, что вблизи НЛ значение $K = Y\tau_{нл}\sqrt{a}$ соизмеримо или даже превышает $K = Y\tau\sqrt{a}$ в точках сечения, наиболее удаленных от НЛ, где касательное

* Если значение нагрузки L меньше минимального исходного значения пороговой нагрузки L_0 , то, как доказано экспериментально [20], значение L_0 не снижается под действием L , т.е. развития дефекта не происходит.

напряжения на площадках под углом 45° к оси стержня $\tau = \sigma/2$ (σ – наибольшее нормальное напряжение от изгибающего момента). Инженерные формулы сопротивления материалов дают для рассмотренных случаев $\tau_{\text{нл}} < \sigma/18$. Однако согласно теории упругости в дополнение к напряжениям, рассчитанным по таким формулам, для прямоугольного сечения получено [21]

$$\sigma_{\text{д}} = 0,2 q(20 z^2/h^2 - 8 z/h)/b;$$

$$\tau_{\text{д}} = \frac{0,6}{bh} \left[\frac{z^2}{2} - \frac{5z^4}{3h^2} - \frac{h^2}{48} \right] \frac{dq}{dx},$$

где z – расстояние до точки сечения от НЛ; $q(x)$ – распределенная нагрузка в зоне приложения сосредоточенной силы. Дополнительные касательные напряжения $\tau_{\text{д}}$ возникают в связи с тем, что при изменяющейся вдоль оси x нагрузке q напряжения $\sigma_{\text{д}}$ увеличивают градиент нормальных напряжений вдоль оси x при постоянном z . По вышеприведенным формулам рассчитывали дополнительные напряжения, возникающие в сечении шириной $b = 8,5$ мм и высотой $h = 6,4$ мм ферритового стержня с пролетом 98 мм и длиной участка $l_0 = 38$ мм при условии, что эпюра q имеет вид треугольника с основанием 0,02 см и высотой $q_{\text{max}} = 10^4$ Н/см; при этом равнодействующая сила $F = 100$ Н. В зоне приложения F дополнительные касательные напряжения на НЛ превышают $\sigma_{\Sigma}/2$, а на расстоянии $0,385h$ от НЛ они соизмеримы с $\sigma_{\Sigma}/2$, где σ_{Σ} – максимальное нормальное напряжение в сечении (за счет $\sigma_{\text{д}}$ оно оказывается на 45% выше σ_{max} на участке длиной l_0). Такое соотношение напряжений приводит к увеличению вероятности разрушения стержня в зоне приложения сосредоточенной силы и объясняет распределение изломов по длине стержня в условиях чистого изгиба.

При тангенциальном растяжении керамических колец и трубок переход от нагружения с заданным темпом до разрушения за 60...100 с к длительному нагружению (время до разрушения 3600...10000 с) приводит к снижению доли разрушений полностью по диаметральной плоскости (с 82 до 16%) и к увеличению разрушений по плоскости, также проходящей через образующую, но наклоненной под углом 45° к радиусу образца. Это указывает на то, что даже в условиях растяжения при переходе от кратковременного нагружения к длительному возрастает роль касательных напряжений в процессе разрушения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при разработке экспресс-методов прогнозирования долговечности керамического изделия представляют интерес исследования кинетики трещин сдвига, а не отрыва.

Резюме

Аналіз поверхонь злому при короткочасному і тривалому згині свідчить про зростаючу роль дотичних напружень при руйнуванні в умовах тривалого навантаження. Установлено, що при розробці експрес-методів прогнозування довговічності доцільно досліджувати кінетику тріщин зсуву, а не відриву.

1. *Беляев Н. М.* Сопротивление материалов. – М.; Л.: Изд-во научн.-техн. лит., 1951. – 856 с.
2. *Evans A. G. and Langdon T. G.* Structural Ceramics. – New York: Pergamon Press, 1976. – 256 с.
3. *Гогоци Г. А., Завада В. П.* Оценка долговечности керамики по параметрам докритического роста трещины // Завод. лаб. – 1982. – № 9. – С. 83 – 85.
4. *Завада В. П., Никольский С. Г., Стрижало В. А. и др.* Сопротивляемость разрушению феррита в условиях длительного нагружения // Пробл. прочности. – 1988. – № 8. – С. 42 – 46.
5. *Никольский С. Г., Бормоткин В. О., Никольская Т. С.* Акустико-эмиссионный контроль прочности керамических турбинных лопаток // Сб. тр. ФТИ им. А. Ф. Иоффе “Границы раздела, прочность и разрушение композиционных материалов”. – Л., 1989. – С. 105 – 112.
6. *Никольский С. Г.* Акустико-эмиссионный контроль прочности керамических панелей // Пробл. прочности. – 1990. – № 6. – С. 102 – 106.
7. *Никольский Г. С., Терентьев В. П., Трусова В. М.* Планирование длительных испытаний на изгиб // Электротехн. пром-сть. Сер. Электротехн. материалы. – 1976. – Вып. 9. – № 74. – С. 12 – 13.
8. *Медведь В. А., Никольский Г. С., Терентьев В. П. и др.* Взаимосвязь распределений прочностных показателей керамических элементов при различных режимах нагружения // Электрон. техника. – 1979. – Вып. 6. – С. 20 – 30.
9. *Никольский С. Г., Терентьев В. П., Бормоткин В. О.* Оценка долговечности феррита при сжатии по результатам испытаний на изгиб. – Л., 1983. – 14 с. – Деп. в ЦНИИ “Электроника” 07.07.83, № 8632/83.
10. *Николаева И. П., Никольский С. Г.* Распределение разрушающих напряжений керамических образцов при разных скоростях нагружения // Пробл. прочности. – 1977. – № 1. – С. 83 – 87.
11. *Николаева И. П., Павлов П. А.* Исследование длительного разрушения фарфора // Там же. – 1980. – № 7. – С. 63 – 66.
12. *Мякин В. Л., Николаева И. П., Никольский С. Г. и др.* Экспериментальное исследование прочности электротехнического фарфора в плоском напряженном состоянии // Науч. Исследования по гидротехнике в 1972 г. – Л.: Энергия, 1973. – С. 91 – 93.
13. *Никольский С. Г., Стельмах В. Т.* Установки для длительных прочностных испытаний опорно-стержневых изоляторов // Электротехн. пром-сть. Сер. Электротехн. материалы. – 1973. – Вып. 8, № 51. – С. 21 – 22.
14. *Никольский С. Г., Николаева И. П., Чеботарев И. В.* Установки для испытаний на тангенциальное растяжение трубчатых образцов // Тр. ЛПИ № 343 “Прочность материалов и конструкций”. – Л., 1975. – С. 50 – 52.
15. *Никольский С. Г., Бормоткин В. О., Никольская Т. С.* Способ определения максимальной нагрузки, еще не снижающей прочность изделия // Сб. докл. II Междунар. конф. “Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности ...”. – СПб ГТУ. – 1997. – С. 89 – 90.

16. *Никольский С. Г., Павлов П. А.* Исследование упругих постоянных электротехнического фарфора // Науч. исследования по гидротехнике в 1972 г. – Л.: Энергия, 1973. – Т. I. – С. 93.
17. *Никольский С. Г., Трусова В. Н.* Уточнение методики расчетов нормальных напряжений при изгибе круглых стержней электротехнического фарфора // Электротехн. пром.-сть. Сер. Электротехн. материалы. – 1973. – Вып. I. – С. 10.
18. *Бормоткин В. О., Медведь В. А., Никольский С. Г. и др.* О перспективности различных методов неразрушающего контроля прочности керамических и бетонных изделий // Науч. исследования по гидротехнике в 1974 г. – Л.: Энергия, 1975. – Т. I. – С. 173 – 174.
19. *Писаренко Г. С., Амелянович К. К., Козуб Ю. И. и др.* Конструкционная прочность стекол и ситаллов. – Киев: Наук. думка, 1979. – 284 с.
20. *Никольский С. Г.* Акустическая эмиссия и прочность керамического изделия // Петербург. журн. электроники. – 1997. – № 1. – С. 47 – 53.
21. *Лурье А. И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

Поступила 30. 05. 2000