

УДК 539.422;681.7.068

ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧЕННОСТИ СКОРОСТИ ДИФФУЗИИ ВОДЫ К ДЕФЕКТУ И ТЕРМОФЛУКТУАЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПОСЛЕ КОНТРОЛЬНОГО ТЕСТА

С. Л. Семенов¹

Проведены оценки влияния диффузионно-ограниченной и термофлуктуационной областей (область II и область III) кривой скорости роста дефектов на величину инертной прочности волоконных световодов после контрольного испытания. Показано, что при скоростях разгрузки, характерных для современного контрольного оборудования, минимальная инертная прочность световода после испытания может быть близка к величине контрольной нагрузки и даже превышать ее.

Время до разрушения волоконного световода на основе кварцевого стекла под нагрузкой в присутствии паров воды определяется эффектом статической усталости [1–4], когда дефекты (трещины) на поверхности стекла под нагрузкой в присутствии паров воды начинают медленно расти. Оценка срока службы световода, учитывающая этот эффект, должна состоять из двух важных стадий:

- определение минимальной возможной прочности полной длины световода, для которого делается оценка;
- вычисление времени до разрушения световода с данной начальной прочностью под такой нагрузкой и в таких условиях окружающей среды, которые возможны при эксплуатации.

Минимальная прочность волоконного световода обычно оценивается с помощью контрольного теста, когда полная длина световода при перематке с катушки на катушку

¹ Научный центр волоконной оптики РАН.

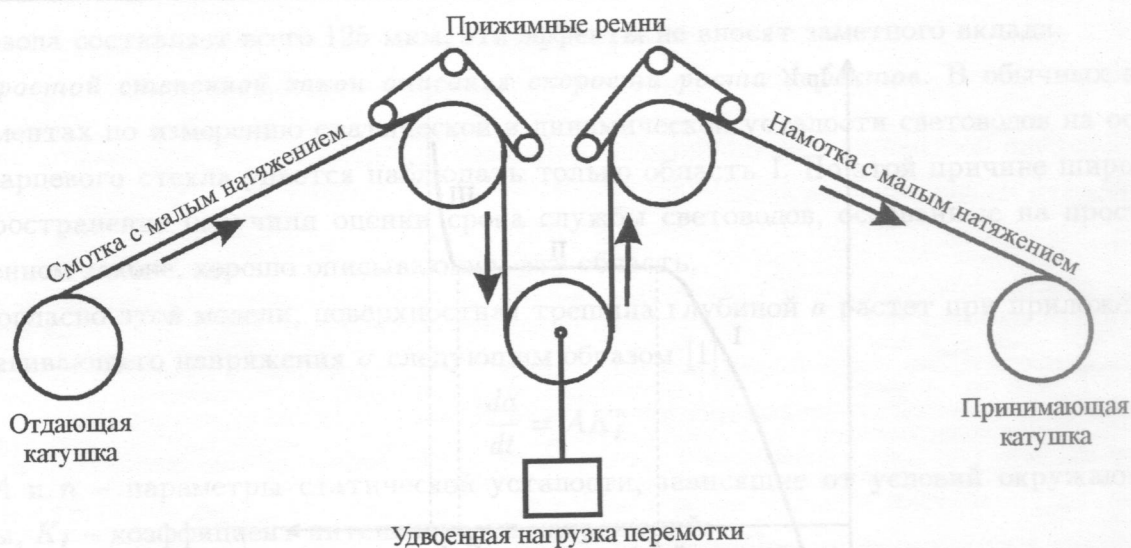


Рис. 1. Типичная схема установки для контрольной перемотки под нагрузкой.

проходит специальное приспособление (рис. 1), в котором к световоду на короткое время прикладывается контрольная нагрузка, а затем происходит разгрузка. Проблемой в данном случае является рост дефектов во время приложения нагрузки и, особенно, при разгрузке, которая не может быть мгновенной. По этой причине инертная прочность (т.е. прочность в отсутствие действия влаги) световода после контрольного теста может оказаться намного ниже контрольной нагрузки [5].

Результаты вычисления минимально возможной инертной прочности после контрольного теста оказываются очень чувствительными к выбору модели, описывающей рост дефектов в кварцевом стекле под нагрузкой. Наиболее часто для описания зависимости скорости роста трещины от ее размера и приложенной нагрузки используется простой степенной закон [1]. При использовании такой модели получается, что минимально возможная инертная прочность после контрольного теста оказывается существенно ниже контрольной нагрузки при любых достижимых скоростях разгрузки [6].

Целью данной работы являлось изучение влияния учета диффузионно-ограниченной и термофлуктуационной областей (область II и область III, рис. 2) кривой скорости роста дефектов на величину инертной прочности волоконных световодов после контрольного испытания. Показано, что при скоростях разгрузки, характерных для современного контрольного оборудования, минимальная инертная прочность световода после испытания может быть близка к величине контрольной нагрузки и даже превышать ее.

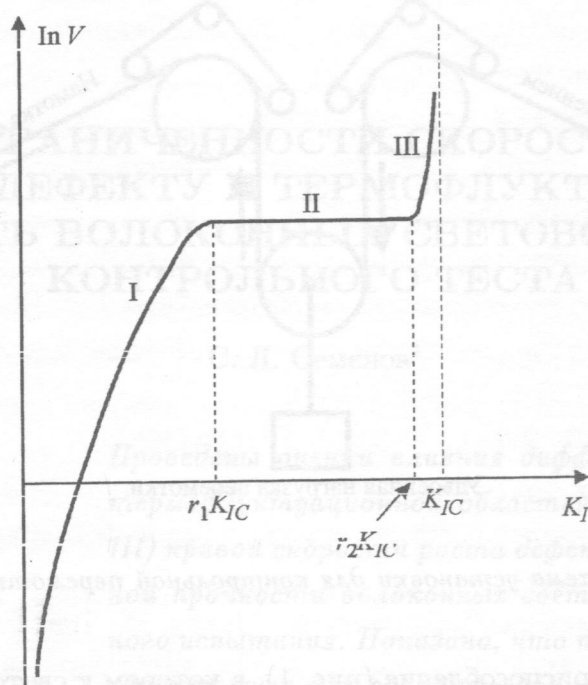


Рис. 2. Зависимость скорости V роста дефекта от коэффициента интенсивности напряжений K_I .

Скорость роста дефектов в кварцевом стекле. В кварцевом стекле скорость роста дефектов поверхности зависит как от растягивающего напряжения в вершине трещины (характеризующегося коэффициентом интенсивности напряжений K_I), так и от количества влаги в окружающей атмосфере [7–9]. При постоянной влажности возможно существование трех областей роста дефекта, схематично показанных на рис. 2 [7]. Области I и II определяются коррозией стекла под нагрузкой из-за реакции между стеклом и водой. При этом в области I скорость роста дефектов быстро нарастает с увеличением растягивающего напряжения, а далее в области II уже практически не нарастает из-за ограничения скоростью диффузии молекул воды к вершине дефекта. В области III скорость снова быстро нарастает за счет термофлуктуационного разрыва перенапряженных связей в вершине дефекта, который зависит только от структуры стекла и температуры, но не зависит от окружающей среды (влажности) [10]. При превышении критической величины коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} начинается очень быстрое “катастрофическое” разрушение. Здесь наблюдается своя сложная динамика [11], но скорость роста дефекта уже приближается к скорости звука в среде, поэтому для нашего случая, когда дефекты имеют размер порядка микрона, а стандартный диаметр

световода составляет всего 125 мкм, эти эффекты не вносят заметного вклада.

Простой степенной закон описания скорости роста дефектов. В обычных экспериментах по измерению статической и динамической усталости световодов на основе кварцевого стекла удается наблюдать только область I. По этой причине широкое распространение получили оценки срока службы световодов, основанные на простом степенном законе, хорошо описывающем эту область.

Согласно этой модели, поверхностная трещина глубиной a растет при приложении растягивающего напряжения σ следующим образом [1]:

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (1)$$

где A и n – параметры статической усталости, зависящие от условий окружающей среды, K_I – коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_I = Y\sigma(a)^{1/2}, \quad (2)$$

Y – геометрический фактор (~ 1), связанный с формой трещины.

Исходной или инертной прочностью S обозначается прочность световода в случае отсутствия медленного докритического роста дефектов (статической усталости):

$$S = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a}}, \quad (3)$$

где K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений, при достижении которого начинается катастрофическое разрушение (для кварцевого стекла $K_{IC} = 0.79MN/m^{3/2}$). В отличие от обычной прочности инертная прочность зависит только от исходной глубины и формы дефекта и не зависит от скорости растяжения при испытаниях на разрыв и от окружающей среды. Ее можно наблюдать только в инертных условиях (вакуум, жидкий азот), либо при очень высоких скоростях растяжения. Обычно измеряемая на растяжение или изгиб прочность оказывается существенно меньше инертной и зависит от скорости растяжения и условий окружающей среды, так как дефекты во время теста успевают заметно подрасти к моменту начала катастрофического разрушения.

Из выражений (1)–(3) можно получить, что если к образцу будет приложено растягивающее напряжение $\sigma(t)$ в течение периода времени t , начальная инертная прочность S_i будет снижаться за счет роста дефекта до некоторого конечного значения S_f , согласно следующему выражению [5]:

$$B(S_i^{n-2} - S_f^{n-2}) = \int_0^t \sigma(\tau)^n d\tau, \quad (4)$$

где

$$B = \frac{2}{(n-2)AY^2K_{ic}^{n-2}} \quad (5)$$

В случае постоянного приложенного напряжения σ_s , время до разрушения можно вычислить следующим образом:

$$t_s = \frac{BS_i^{n-2}}{\sigma_s^n} \quad (6)$$

Можно предположить, что для оценки снизу времени до разрушения образца под нагрузкой достаточно воспользоваться выражением (6), в котором в качестве начальной инертной прочности после контрольного теста S_i взять напряжение при контрольном тесте σ_p . Но, как уже указывалось выше, из-за роста дефектов под нагрузкой и, особенно, при разгрузке во время контрольного теста конечная инертная прочность может оказаться многократно ниже [5] (рис. 3).

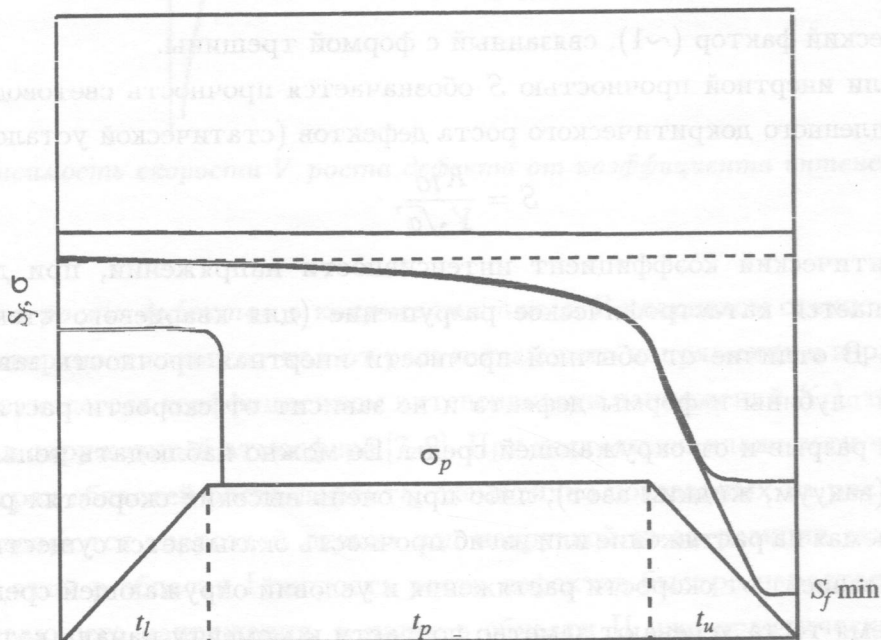


Рис. 3. Изменения инертной прочности образца в ходе контрольной перематки под нагрузкой σ_p . t_p — время действия нагрузки, t_l — время нагружения, t_u — время разгрузки, $S_{f \min}$ — минимально возможная инертная прочность после теста.

Насколько минимальная инертная прочность после контрольного теста окажется ниже контрольного напряжения σ_p , зависит от времени разгрузки t_u . Чем больше время

разгрузки, тем ниже оказывается значение минимальной инертной прочности и наоборот, при “быстрой” разгрузке снижение может быть небольшим [5, 10]. Критерием “быстрой” разгрузки является следующее выражение [6]:

$$t_u < t_c = \frac{(n-2) \cdot B}{\sigma_p^2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) можно получить при типичных параметрах статической усталости для высокопрочных световодов ($n = 20$; $B = 3.1 \cdot 10^{-6}$ GPa²s при 50% RH (относительной влажности) и комнатной температуре [12]) величину $t_c = 5.4 \cdot 10^{-5}$ с. Соответственно для времени разгрузки, характерного для современного контрольного оборудования ($t_u = 10^{-3}$ с), минимальная инертная прочность окажется на уровне $\sim 0.34\sigma_p$, а при $t_u = 10^{-2}$ с – даже $\sim 0.15\sigma_p$.

Влияние областей II и III. Так как процесс разгрузки оказывается очень быстрым ($\sim 10^{-3}$ с), может оказаться, что области II и III могут внести заметный и даже определяющий вклад в оценки минимально возможной инертной прочности после контрольного теста. Поэтому для таких оценок нужно использовать более сложное описание зависимости скорости роста дефектов от нагрузки. Для удобства расчетов каждую область можно описать отдельным степенным законом с соответствующими параметрами n_1 , A_1 ; n_2 , A_2 и n_3 , A_3 (рис. 2):

$$\frac{da}{dt} = A_1 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^{n_1} \quad \text{для } K_I \leq r_1 K_{IC} \quad (8)$$

$$\frac{da}{dt} = A_2 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^{n_2} \quad \text{для } r_1 K_{IC} \leq K_I \leq r_2 K_{IC} \quad (9)$$

$$\frac{da}{dt} = A_3 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^{n_3} \quad \text{для } K_I \geq r_2 K_{IC} \quad (10)$$

где r_1 и r_2 – параметры, характеризующие положение перехода от одной области к другой. Соответствующие параметры B_1 , B_2 и B_3 можно вычислить, пользуясь выражением (5). Главной проблемой в этом случае оказывается определение параметров областей II и III.

Эксперименты с большими (~ 1 –10 мм) трещинами в массивных образцах кварцевого стекла показывают, что на относительно высоких скоростях роста (~ 0.1 –10 мкм/с) крутая зависимость ($n_1 \sim 20$ –40) меняется на пологую ($n_2 \sim 3$ –10), то есть наблюдается переход от первой ко второй области [8, 9]. Однако правомерность простого перенесения этих данных на дефекты в световодах (типичный размер ~ 1 мкм) вызвала большие сомнения из-за наблюдавшейся разницы в величине параметров статической усталости у высокопрочных световодов и у массивных образцов.

Т а б л и ц а 1

Параметры усталости для световодов с дефектами разных типов [12]

Царапины и вплавленные частицы	Индентированные световоды
$n_1 = 27$	$n_1 = 31$
$B_1 = 0.7 \cdot 10^{-7} \text{ ГПа}^2\text{с}$	$B_1 = 0.4 \cdot 10^{-9} \text{ ГПа}^2\text{с}$
$r = 0.757$	$r = 0.70$
$n_2 = 0.5$	$n_2 = 3.0$
$B_2 = -1.9 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^2\text{с}$	$B_2 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ ГПа}^2\text{с}$

Наблюдение роста дефектов микронного размера напрямую в световодах вызывало большие экспериментальные трудности. Однако вторая область роста дефектов в случае волоконных световодов должна приводить к отклонению от простого степенного закона зависимости прочности на растяжение от скорости растяжения [13]. Для высокопрочных световодов (размер дефекта ~ 10 нм) это отклонение должно наблюдаться при слишком больших скоростях растяжения ($> 10^4$ ГПа/с) [14], что вызывает большие экспериментальные трудности [15]. К счастью, для световодов с пониженной прочностью, которая соответствует напряжению контрольного теста (~ 1 ГПа) влияние второй области должно наблюдаться при меньших скоростях растяжения (10–100 ГПа/с) [14]. Такие эксперименты с помощью специально сконструированной высокоскоростной разрывной машины были проведены в лабораторных условиях [12]. В результате были получены параметры для области II и прилегающей к ней части области I для световодов в защитном полимерном покрытии с дефектами в виде царапин и вплавленных в поверхность частиц оксида циркония, а также для световодов без покрытия с дефектами, нанесенными путем индентирования алмазной пирамидкой в форме угла куба (табл. 1) [12].

Царапины и вплавленные частицы являются наиболее вероятными дефектами поверхности волоконного световода. Так как контрольный тест должен проводиться в лабораторных условиях, то параметры, полученные для световодов с такими дефектами в [12] при 50%RH и 23°C можно прямо использовать для оценки минимальной инертной прочности с учетом влияния области II.

Используя параметры из табл. 1, можно получить, что при напряжении контрольного теста $\sigma_p = 0.7$ ГПа, для царапин и вплавленных частиц $t_c = 5.8 \cdot 10^{-3}$ с. Для индентированных световодов без защитного полимерного покрытия получается $0.51 \cdot 10^{-3}$ с.

Такие времена разгрузки вполне достижимы на современном оборудовании для контрольного теста. То есть, при учете влияния области II оценки минимальной инертной прочности после контрольного теста дают большие величины, чем при использовании простого степенного закона роста дефектов. Результаты таких оценок приведены на рис.4. Для световодов в защитном полимерном покрытии с царапинами или вплавленными частицами оказывается, что $S_{f\min}/\sigma_p = 0.95$ при $t_u = 10^{-3}$ с и $S_{f\min}/\sigma_p = 0.90$ при $t_u = 2 \cdot 10^{-3}$ с.

Гораздо сложнее оказывается учесть влияние области III, так как в настоящее время для кварцевого стекла (массивных образцов или волокон) в лабораторных условиях нет прямых экспериментальных данных об этой области. Существуют только оценки, подтвержденные экспериментально на световодах с герметичным металлическим покрытием [10], для медленного роста дефектов в отсутствие влаги в окружающей среде, когда этот рост возможен только за счет термофлуктуационного разрыва напряженных связей в вершине дефекта. Это тот же самый механизм, что и в области III в лабораторных условиях. Время до разрушения t при постоянной растягивающей нагрузке σ_s , в этом случае оценивается следующим выражением:

$$t = t_0 \exp \left[\frac{U_0}{kT} \left(1 - \frac{\sigma_s}{S_i} \right) \right], \quad (11)$$

где t_0 – величина порядка периода атомных термофлуктуаций ($\sim 10^{-13}$ с); U_0 – энергия Si-O связи в кварцевом стекле (~ 110 ккал/моль); S_i – исходная инертная прочность в отсутствие термофлуктуаций (при $T = 0^\circ K$).

Так как в данном случае мы имеем дело с экспоненциальной зависимостью, параметр n оказывается переменной, зависящей от приложенной нагрузки. Величину параметра n можно получить из следующего выражения:

$$n = - \frac{d(\ln(t_s))}{d(\ln(\sigma_s))} = \frac{U_0}{kT} \frac{\sigma_s}{S_i}. \quad (12)$$

Пользуясь выражениями (12) и (11), можно получить, что величина параметра n находится в диапазоне от 155 до 135, если время до разрушения находится в диапазоне от 1 секунды до 30 лет. Эксперименты по статической усталости световодов, покрытых герметичным оловянным покрытием [10], подтвердили эту оценку.

Таким образом, вышеприведенное описание области III можно использовать и при оценках минимальной инертной прочности после контрольного теста для световодов с обычным полимерным покрытием. Использование выражений (9)–(12) и параметров

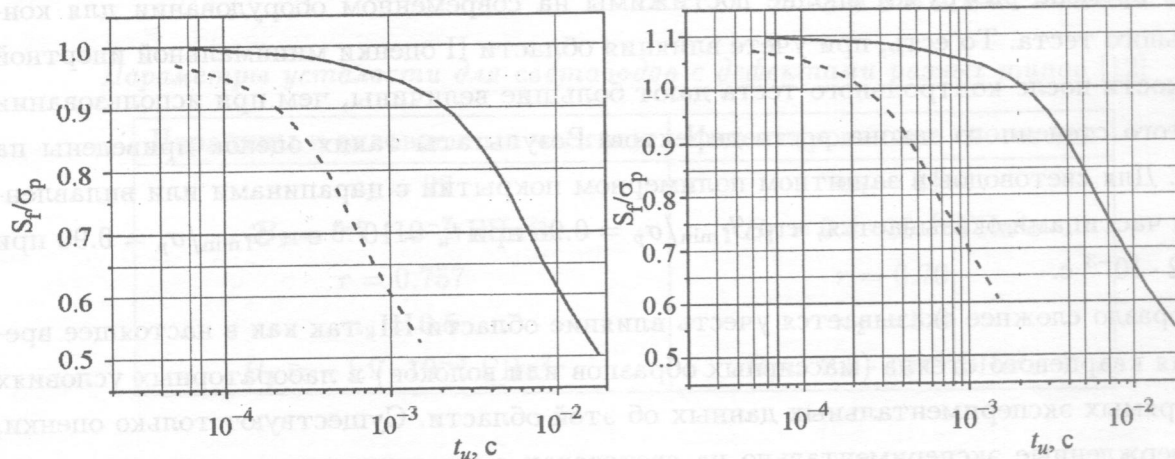


Рис. 4. Результаты расчетов минимальной инертной прочности после контрольного теста от времени разгрузки при учете влияния области II для световодов с царапинами или вплавленными частицами в защитном полимерном покрытии (сплошная линия), а также для индентированных световодов без покрытия (пунктирная линия).

Рис. 5. Результаты расчетов минимальной инертной прочности после контрольного теста от времени разгрузки при учете влияния областей II и III для световодов с царапинами или вплавленными частицами в защитном полимерном покрытии (сплошная линия), а также для индентированных световодов без покрытия (пунктирная линия).

области II из табл. 1 позволяет получить параметры, необходимые для описания области III при комнатной температуре: $n_3 = 165$; $B_3 = 3.5 \cdot 10^{-13}$ Гпа²с; $r_2 = 0.91$ (для индентированных световодов) или $r_2 = 0.90$ (для царапин и вплавленных частиц).

Рисунок 5 представляет результаты расчетов минимальной инертной прочности после контрольного теста при учете влияния всех трех областей (I, II и III). Согласно этим расчетам, при некоторых значениях времени разгрузки минимальная прочность после контрольного теста может оказаться равной или даже выше контрольного напряжения. Здесь нет никакого противоречия, так как дефект, попав из области II в область III, так быстро увеличивает свою скорость, что обязательно приводит к разрушению световода в соответствующих условиях разгрузки. Поэтому выживают в контрольном тесте только дефекты, бывшие в областях I и II, то есть к началу разгрузки имевшие прочность на $\sim 10\%$ выше контрольного напряжения. Похожий эффект описывался в статье [16] для случая массивных образцов силикатного стекла.

Выводы. Проведены оценки влияния диффузионно-ограниченной и термофлуктуаци-

онной областей (область II и область III) кривой скорости роста дефектов на величину инертной прочности волоконных световодов после контрольного испытания. Показано, что при скоростях разгрузки, характерных для современного контрольного оборудования, минимальная инертная прочность световода после испытания может быть близка к величине контрольной нагрузки и даже превышать ее.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. J. Charles, J. Applied Physics **29**, 1549 (1958).
- [2] S. Sakaguchi, T. Kimura, J. Amer. Ceram. Soc. **64**, 259 (1981).
- [3] W. J. Duncan, P. W. France, S. P. Craig, in *Strength of inorganic glass* (New York: Plenum Press, 1985), p. 309.
- [4] M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian, J. Amer. Ceram. Soc. **71**, 177 (1988).
- [5] A. G. Evans, S. M. Wiederhorn, Int. J. Fracture **10**, 379 (1974).
- [6] Y. Mitsunaga et al., J. Applied Phys. **53**, 4847 (1982).
- [7] S. M. Wiederhorn, J. Amer. Ceramic Soc. **50**, 407 (1967).
- [8] P. Chanticul et al., J. Amer. Ceramic Soc. **66**, 515 (1983).
- [9] A. G. Evans, Inter. J. of Fracture **10**, 251 (1974).
- [10] V. A. Bogatyryov et al., Optical Engineering **30**, 690 (1991).
- [11] О. Б. Наймарк, Физическая мезомеханика **6**, 45 (2003).
- [12] S. L. Semjonov et al., Proc. SPIE **4215**, 28 (2000).
- [13] W. Griffioen et al., 43th Int. Wire & Cable Symp. Proc., 1994 (Atlanta, IWCF, 1994).
- [14] T. Svensson, Mater. Research Soc. Symp. Proc. **531**, 47 (1998).
- [15] S. L. Semjonov, M. M. Bubnov, Mater. Research Soc. Symp. Proc. **531**, 243 (1998).
- [16] J. E. Ritter et al., J. Mater. Sci. **15**, 2275 (1980).

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 16 июня 2007 г.