

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ДЛЯ СИЛІКАТНОГО НЕОРГАНІЧНОГО СКЛА

У статті наведено дані щодо дослідження кінетики руйнування силікатного неорганічного скла. Експерименти проведені на зразках склопластинок з крайовими тріщинами при розтягу та трьохточковому згині. При цьому визначались величини коефіцієнтів інтенсивності напружень (КИН) та швидкості зміни величин КИН. Оцінено вплив температури та вологості на одержані результати. Гранічний стан силікатного неорганічного скла розраховано на базі одержаних експериментальних результатів згідно з фізико-механічним критерієм тензора діелектричної проникності (ТДП).

Ключові слова: неорганічне скло, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, граничний стан, тензор діелектричної проникності.

В статье приведены данные по исследованию кинетики разрушения силикатного неорганического стекла. Эксперименты произведены на образцах стеклопластинок с краевыми трещинами при растяжении и трехточечном изгибе. При этом определялись величины коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и скорости изменения величин КИН. Оценено влияние температуры и влажности на полученные результаты. Граничное состояние силикатного неорганического стекла рассчитано на базе полученных экспериментальных результатов согласно физико-механического критерия тензора диэлектрической проницаемости (ТДП).

Ключевые слова: неорганическое стекло, трещина, коэффициент интенсивности напряжений, граничное состояние, тензор диэлектрической проницаемости,

The article presents data on the study of the kinetics of destruction inorganic silicate glass. Experiments conducted on samples glass plates with boundary cracks in tension and bending three dot. This value determined stress intensity factors (SIF) and the speed changes of SIF. The effect of temperature and humidity on the results obtained. Limit state inorganic silicate glass calculated on the basis of experimental results obtained by physical and mechanical criteria permittivity tensor (MCP).

Key words: inorganic glass, crack, stress intensity factor, limiting state, the permittivity tensor.

Постановка проблеми. Силікатне неорганічне скло є конструкційним матеріалом для багатьох елементів машин і конструкцій. Це і таке класичне застосування, як віконні та дверні конструкції, скло кабін авто та спеціалізованих машин (зі спеціальними добавками та модифікаціями), складова частина триплексів (ілюмінатори літаків та підводних човнів), електровакуумне скло приладів. Тому проблема вивчення напружено-деформованого стану (НДС), розподілу величин КИН при появі мікротріщин, експлуатації при різних температурах та вологості (для машин різного функціонального призначення) є дуже актуальною. Рішення цієї проблеми не завжди можливе у рамках чисто теоретичних підходів та застосування чисельних методів, оскільки фізико-механічні властивості неорганічного силікатного скла суттєво залежать від ряду факторів (наявності поверхневих мікротріщин, температури, вологості), які важко комплексно врахувати аналітично. Тому

дієвим для вирішення цієї проблеми є застосування експериментальних методів.

Аналіз досліджень та публікацій. Визначення параметрів НДС, величин КИН для об'єктів з тріщинами, граничного стану елементів машин та конструкцій є одним із ключових завдань конструкторів-проектувальників нової техніки. Тому розробка нових та удосконалення існуючих методів визначення параметрів механічної міцності є актуальною та необхідною задачею. Цьому присвячено ряд досліджень [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. Серед експериментальних методів механіки особливе місце посідають оптичні, як одні з найдієвіших та найефективніших [1; 5; 7; 8; 9]. Такий конструкційний матеріал, як неорганічне скло, дозволяє безпосередньо застосовувати метод фотопружності [1; 9]. Але необхідно підкреслити, що застосування поляризаційно-оптичного методу в цьому випадку має певні складності, пов'язані з низькою оптичною чутливістю скла.

Постановка завдання. Дослідити кінетику руйнування та граничний стан силікатного неорганічного скла за допомогою поляризаційно-оптичного методу та фізико-механічного критерію ТДП.

Матеріали та результати дослідження. Для вирішення поставленого завдання, необхідно розвинути поляризаційно-оптичний метод для розв'язання задач механіки руйнування (визначення величин КІН) для слабких картин оптичної анізотропії (коли оптична різниця ходу не перевищує однієї довжини хвилі λ зонduючого випромінювання) у випадку як однорідного, так і неоднорідного основного напруженого стану. У роботі [9] одержано формули для визначення величин КІН у тонкостінних елементах конструкцій для випадку однорідного основного напруженого стану. При неоднорідному основному напруженому стані визначати вказані параметри важко. У цьому випадку пропонується проводити виміри напруженого стану в двох різних точках l та m , що знаходяться в області дії пружної асимптотики Ірвіна-Вестергарда [2]. Відомо, що напружений стан тіла з тріщиною можна записати у вигляді суми:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}, \quad (1)$$

де σ'_{ij} – компоненти загального напруженого стану;

σ_{ij}^0 – компоненти основного напруженого стану;

σ_{ij} – компоненти додаткового напруженого стану.

Звідки:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \sigma_{ij}^0. \quad (2)$$

Для першого та другого типів деформації берегів тріщини, компоненти додаткового напруженого стану описуються відповідно, наведеними нижче формулами:

I тип деформації берегів тріщини (нормальний відрив):

$$\begin{cases} \sigma_x - \sigma_y = \frac{\delta}{Cd} \cos 2\varphi, \\ \tau_{xy} = \frac{\delta}{Cd} \sin 2\varphi \end{cases} \quad (3)$$

$$(4)$$

де σ_x, σ_y – нормальні напруження, паралельні відповідним осям координат;

τ_{xy} – дотичне напруження, яке діє в площині xy ;

φ – кут ізокліни (кут між напрямком квазіголовного напруження та віссю x);

δ – різниця оптичного ходу променів;

C – коефіцієнт оптичної чутливості;

d – товщина пластинки.

Після ряду перетворень, одержуємо формули для визначення величин КІН K_I та K_{II} за даними фотопружних вимірів у двох точках l та m дії пружної асимптотики біля вершини тріщини:

$$K_I = \frac{A(\delta_l \cos 2\varphi_l - \delta_m \cos 2\varphi_m) + B_1(\delta_l \sin 2\varphi_l - \delta_m \sin 2\varphi_m)}{Cd(\sqrt{1/\sqrt{r_l}} - 1/\sqrt{r_m})} \quad (5)$$

$$K_{II} = \frac{A_2(\delta_l \cos 2\varphi_l - \delta_m \cos 2\varphi_m) + B_2(\delta_l \sin 2\varphi_l - \delta_m \sin 2\varphi_m)}{Cd(\sqrt{1/\sqrt{r_l}} - 1/\sqrt{r_m})}. \quad (6)$$

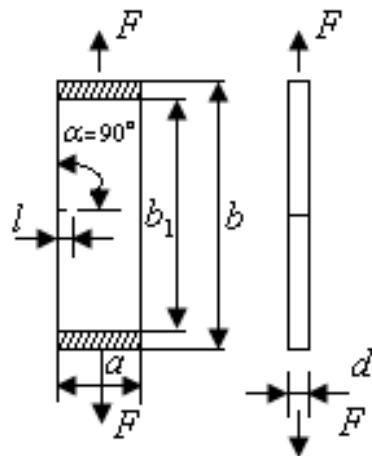
Вирази (5) та (6) – це формули експериментального визначення K_I та K_{II} методом фотопружності при різних кутах Θ наближення до вершини тріщини.

Якщо проводити фотопружні вимірювання при $\theta = \frac{\pi}{2}$, формули (5) та (6) суттєво спростяться. Для цього випадку одержимо:

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi}[\delta_l(\sin 2\varphi_l + \cos 2\varphi_l) + \delta_m(\sin 2\varphi_m + \cos 2\varphi_m)]}{Cd(\sqrt{1/\sqrt{r_l}} - 1/\sqrt{r_m})}; \quad (7)$$

$$K_{II} = \frac{\sqrt{\pi}[\delta_l(\sin 2\varphi_l - \cos 2\varphi_l) + \delta_m(\sin 2\varphi_m - \cos 2\varphi_m)]}{Cd(\sqrt{1/\sqrt{r_l}} - 1/\sqrt{r_m})}. \quad (8)$$

Для підтвердження запропонованої методики, проведено два тестових експерименти. Пластинка із скла з наскрізною крайовою тріщиною, яку розміщено під прямим кутом до краю, знаходиться під дією розтягуючого зусилля $F=29$ н.



Розміри пластинки:

$a = 10,3$ мм

$b = 40$ мм

$d = 0,72$ мм

Відстань між захватами $b_1 = 30$ мм.

Довжина тріщини $l = 2$ мм.

Рис. 1. Тестовий експеримент 1 (розтяг склопластинки з крайовою тріщиною $\alpha = 90^\circ$)

Розрахункове значення КІН K_I^P визначалось за формулою:

$$K_I^P = \sigma \sqrt{\pi l} \xi_1. \quad (9)$$

Поправочний коефіцієнт ξ_1 у формулі (9) розраховуємо за методикою, наведеною в роботі [2]:

$$\xi_1 = 1,12 - 0,231 \frac{l}{a} + 10,55 \left(\frac{l}{a}\right)^2 - 21,72 \left(\frac{l}{a}\right)^3 + 30,39 \left(\frac{l}{a}\right)^4, \quad (10)$$

де a – ширина зразка.

У таблиці 1 наведено результати експерименту із визначення величини КІН K_I шляхом вимірювання оптичної анізотропії у т.1 та т.

Таблиця 1

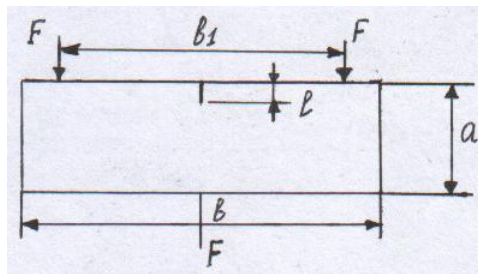
r_l	r_l/l	r_m	r_m/l	K_I^e	K_I^P	ε
$m \cdot 10^{-3}$		$m \cdot 10^{-3}$		МПа · м ^{1/2}	МПа · м ^{1/2}	%
0,08	0,04	0,40	0,20	0,428	0,434	1,4
0,20	0,10	0,40	0,20	0,444	0,434	2,4
0,30	0,15	0,40	0,20	0,478	0,434	10,2
0,20	0,10	0,30	0,15	0,461	0,434	6,2

Аналізуючи дані таблиці 1, дійти висновку про добре співпадіння теоретичних та експериментальних даних.

При виборі точки 1 поблизу вершини тріщини (в діапазоні $r_l/l = 0,04-0,10$) похибка експерименту складала 1,4 %-2,4 %, при збільшенні r_l/l до 0,15 – похибка зростає до 10,2 %. Точка вимірювання т

обиралась у кінці прямолінійної ділянки ізокліни ($r_m/l = 0,20$).

2. Пластинка зі скла з наскрізною крайовою тріщиною, яку розміщено під прямим кутом до краю, знаходиться під дією триточкового згину. Зусилля $F = 5H$, відстань між опорами $b_1 = 36$ мм, довжина тріщини $l = 28$ мм.



Розміри пластинки:

$$a = 10,2 \text{ мм}$$

$$b = 40 \text{ мм}$$

$$d = 0,8 \text{ мм}$$

Рис. 2. Схема навантаження склопластинки при триточковому згині

Розрахункове значення КІН K_I^P визначалось за формулою:

$$K_I^P = \sigma \sqrt{\pi l} \xi_2. \quad (11)$$

Величина поправочного коефіцієнту ξ_2 розраховувалась за методикою, наведеною в роботі [2]:

$$\xi_2 = 1,09 - 1,735 \frac{l}{a} + 8,2 \left(\frac{l}{a}\right)^2 - 14,18 \left(\frac{l}{a}\right)^3 + 14,57 \left(\frac{l}{a}\right)^4 \quad (12)$$

У таблиці 2 наведено результати експериментальних та розрахункових даних визначення КІН K_I . Експериментально одержані значення K_I^l визначались за наведеною вище методикою, шляхом вимірювання оптичної анізотропії у т.1 та т.

Таблиця 2

r_l	r_l/l	r_m	r_m/l	K_I^e	K_I^P	ε
$m \cdot 10^{-3}$		$m \cdot 10^{-3}$		МПа · м ^{1/2}	МПа · м ^{1/2}	%
0,08	0,03	0,40	0,14	0,415	0,423	1,8
0,20	0,07	0,40	0,14	0,437	0,423	3,4
0,30	0,11	0,40	0,14	0,475	0,423	12,3
0,20	0,07	0,30	0,14	0,460	0,423	8,7

Аналізуючи дані таблиці 2, можна дійти висновку про добре співпадіння теоретичних та експериментальних даних. При виборі т.1 поблизу вершини тріщини (в діапазоні $r_l/l = 0,03-0,07$), похибка експерименту складала 1,8 %-3,4 %, при збільшенні r_l/l до

0,11 похибка зростає до 12,3 %. Точка вимірювання т обиралась у кінці прямолінійної ділянки ізокліни ($r_m/l = 0,14$).

Проведено дослідження кінетики руйнування силкатного неорганічного скла на 80 зразках з крайовою

вими тріщинами у діапазоні температур 280-300 К і вологості 46-100 %. Вимірювання оптичної анізотропії проводилось за допомогою поляризаційного агрегатного мікроскопа ПОЛАМ Р-312. Навантаження зразків із силікатного неорганічного скла з тріщинами

здійснювалось за допомогою спеціально розроблених навантажуючих пристроїв для реалізації розтягу та трітточкового згину. Визначались величини КІН, швидкості зміни величин КІН, зміна в часі довжини тріщини.

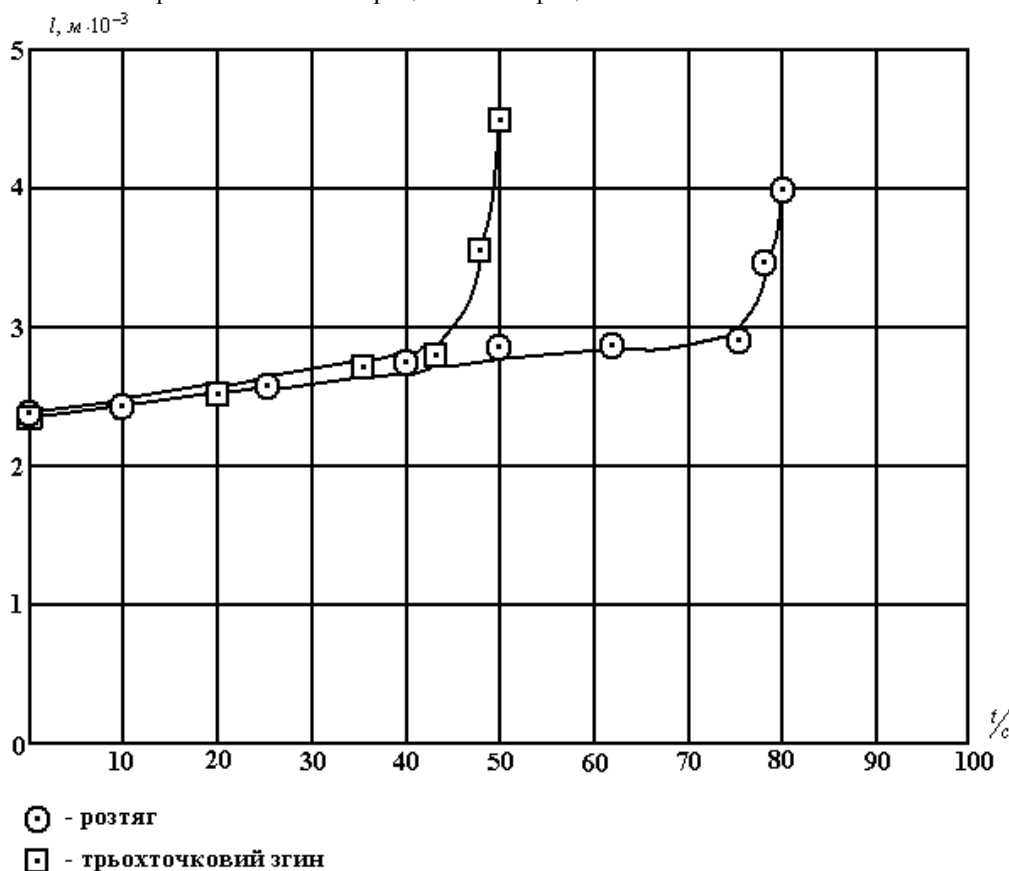


Рис. 1. Кінетика зміни довжини крайової тріщини в пластинках із силікатного неорганічного скла при розтязі та трітточковому згині

На рис. 1 наведено характерні усереднені графіки зміни довжини тріщини в часі при розтягу та трітточковому згині. Характер графіків принципово схожий, складається з двох основних ділянок і ділянки повільного росту тріщини та стрімкого поширення, яке безпосередньо веде до руйнування. При розтягу ділянка повільного зростання в часі дорівнює 75 с, при трітточковому згині процес іде швидше і відповідний час дорівнює 35 с. Відповідно, при розтягу довжина тріщини на першій ділянці зростає від 2,2 мм до 2,8 мм; при трітточковому згині від 2,2 мм до 2,6 мм. Друга ділянка (швидкого поширення тріщини) продовжується і для випадку розтягу, і для трітточкового згину складає 5 с. У зоні швидкого поширення довжина тріщини зростає від 2,8 мм до 4 мм при розтягу, та від 2,6 мм до 4,5 мм при трітточковому згині, після чого настає швидке руйнування зразка. Схожий характер зміни величини КІН K_I в часі для розтягу та трітточкового згину наведено на рис. 2.

Аналізуючи графіки залежностей $K_I(t)$, бачимо, що їх характер аналогічний, як і для $l(t)$, залежно від виду навантаження. Для розтягу зона повільного проростання тріщини знаходиться в межах $K_I = 0,43 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2} - 0,59 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2}$, для трітточкового згину – $K_I = 0,45 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2} - 0,50 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2}$. Відповідно, зона швидкого поширення тріщини при розтягу $0,59 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2} - 0,80 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2}$, для трітточкового згину $0,50 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2} - 0,69 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2}$.

Вплив зміни температури має наступний характер. При підвищенні температури від 280К до 300К початковий ріст тріщини починається при більш низьких значеннях КІН. Але руйнування проходить, практично, при тих самих значеннях КІН $0,70 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2} - 0,80 \text{ МПа} \cdot \dot{l}^{1/2}$. Вплив вологості на кінетику росту тріщини та граничний стан був мінімальним.

На рис. 3 наведено графік залежності величин співвідношення КІН K_I/K_{II} від кута α нахилу тріщин до краю пластини.

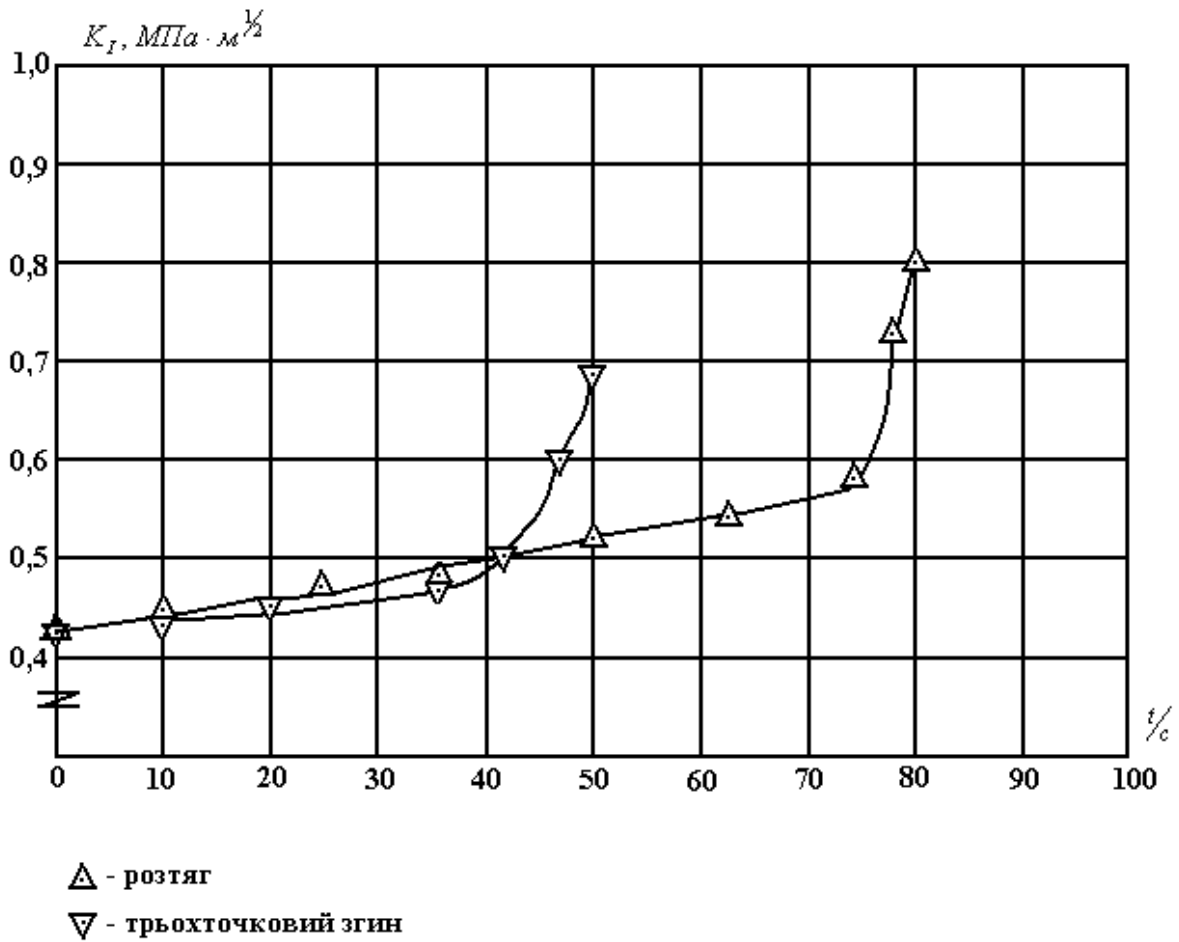


Рис. 2. Кінетика зміни величини КІН K_I для крайової тріщини в пластинках з силікатного неорганічного скла при розтязі та триточковому згині

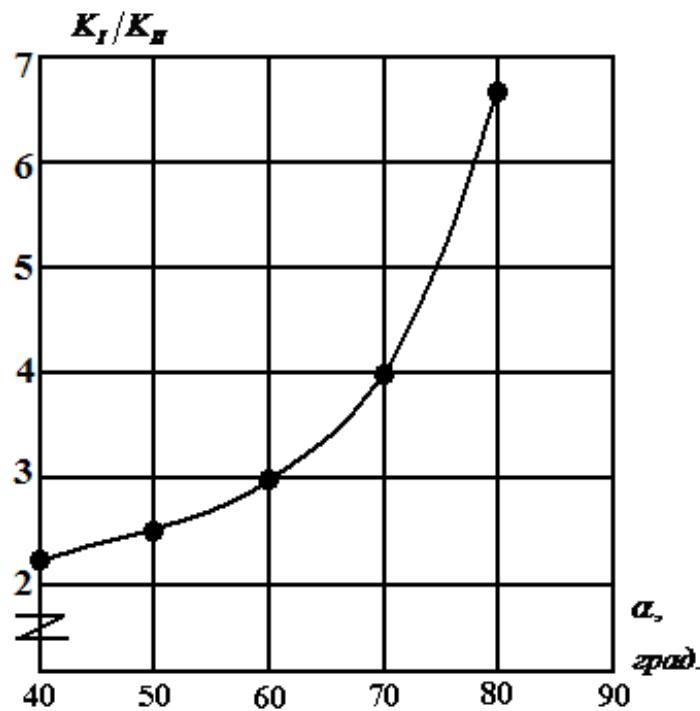


Рис. 3. Графік залежності величини співвідношення K_I/K_{II} від кута α нахилу крайової тріщини до краю пластинки

Розрахуємо еквівалентний КІН за формулами фізико-механічного критерія ТДП. Врахуємо, що для силікатного скла, матеріалу з дуже малою оптичною чутливістю, величини оптико-механічних констант C_1 і C_2 досить близькі, $C_1/C_2 \approx 1$, $A^{0*} \approx B^{0*}$.

$$K_{екв1}(K_I/K_{II} = 2,2) = A^{0*} \cdot 3,1 + B^{0*} \cdot 7 \approx 10,1 \cdot A^{0*}, \quad (13)$$

$$K_{екв2}(K_I/K_{II} = 2,63) = A^{0*} \cdot 3 + B^{0*} \cdot 8 \approx 11 \cdot A^{0*}, \quad (14)$$

$$K_{екв3}(K_I/K_{II} = 3) = A^{0*} \cdot 3 + B^{0*} \cdot 9 \approx 12 \cdot A^{0*}, \quad (15)$$

$$K_{екв4}(K_I/K_{II} = 4) = A^{0*} \cdot 2,5 + B^{0*} \cdot 10 \approx 12,5 \cdot A^{0*}, \quad (16)$$

$$K_{екв5}(K_I/K_{II} = 6,67) = A^{0*} \cdot 1,5 + B^{0*} \cdot 10 \approx 11,5 \cdot A^{0*}, \quad (17)$$

Результати розрахунків представлено у вигляді таблиці 3.

Таблиця 3

№ з/п	α , град.	K_I/K_{II}	K_I Відн.од.	K_{II} Відн.од.	$K_{екв}^{ТДП} / A^{0*}$
1	40	2,20	3,1	7,0	10,1
2	50	2,63	3,0	8,0	11,0
3	60	3,0	3,0	9,0	12,0
4	70	4,0	2,5	10,0	12,5
5	80	6,67	1,5	10,0	11,5

Висновки

1. Розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження матеріалів з низькою оптичною чутливістю.

2. Визначено за даними поляризаційно-оптичного методу параметри кінетики руйнування неорганічного силікатного скла.

3. Оцінено вплив температури та вологості на руйнування склоразривів з тріщинами при розтягу та триточковому згині.

4. Визначено параметри граничного стану неорганічного силікатного скла згідно з фізико-механічним критерієм ТДП.

ЛІТЕРАТУРА

- Александров А. Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела [текст] / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. – М. : Наука, 1973. – 576 с.
- Панасюк В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках [текст] / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацьшин. – К. : Наук. думка, 1976. – 444 с.
- Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів [текст] / В. В. Божидарнік, О. Е. Андрейків, Г. Т. Сулим; В. В. Божидарнік (заг. ред.); Луцький державний технічний університет. – Луцьк : Надстир'я, 2007.
- Каминский А. А. Механика разрушения полимеров [текст] / А. А. Каминский, Д. А. Гаврилов – К. : Наук. Думка, 1988. – 224с.
- Табанюхова З. М. Решение задач прочности сооружений с концентраторами методом фотоупругости : автореф. на соиск. науч. степени докт. физ.-мат. наук : спец. 01.020.04. «Механика деформируемого твердого тела» / М. В. Табанюхова. – Новосибирск, 2006. – 42 с.
- Фриштер Л. Ю. Расчетно-экспериментальный метод исследования НДС составных конструкций в зонах концентрации напряжений : автореф. дис. на соиск. науч. степени докт. физ.-мат. наук [текст] / Л. Ю. Фриштер. – Москва, 2009. – 40 с.
- Рудяк Ю. А. Математичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання / Ю. А. Рудяк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 6. – С. 264–267.
- Рудяк Ю. А. Метод визначення величин коефіцієнтів інтенсивності напружень за даними вимірювання поглинання інтенсивності світла / Ю. А. Рудяк // Вісник Сумського державного університету, технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 88–91.
- Myl'nikov A. V. Investigation of glass structural elements with stress concentrators by optical method / A. V. Mylnikov, R. B. Tverdostaup, Yu. A. Rudyak Recent Advances in Experimental Mechanics // Proceedings of the 10th International conference on experimental mechanics. – Lisabon. – 18-22 July 1994. – P. 201–204.

Рецензенти: **Кутковецький В. Я.**, д.т.н., професор;
Сирота О. А., к.т.н., доцент.

© Рудяк Ю. А., Ткаченко Г. І.,
Грибков О. В., Шостак Д. І., 2012

Дата надходження статті до редколегії 15.12.2012 р.

РУДЯК Юрій Аронович – кандидат фізико-математических наук, заведуючий кафедрою медичинської фізики і медичинського обладнання Тернопольського державного медичинського університету ім. І. Я. Горбачевського.

Коло наукових інтересів: исследование конструкционных материалов.

ТКАЧЕНКО Анна Игоревна – ассистент кафедры медичинської фізики і медичинського обладнання Тернопольського державного медичинського університету ім. І. Я. Горбачевського.

Коло наукових інтересів: исследование конструкционных материалов.

ГРИБКОВ Александр Владимирович – старший лаборант кафедри медичинської фізики і медичинського обладнання Тернопольського державного медичинського університету ім. І. Я. Горбачевського.

Коло наукових інтересів: исследование конструкционных материалов.

ШОСТАК Дмитрий Игоревич – сотрудник лаборатории медичинської фізики Тернопольського державного медичинського університету ім. І. Я. Горбачевського

Коло наукових інтересів: экспериментальная физика, оптические методы.