

П.П.Гонтаровський, Н.В.Сметанкіна,  
С.В.Угрімов, Н.Г.Гармаш, І.І.Мележик

### МОДЕЛЮВАННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ІОНОЗМІЦНЕНОГО СИЛІКАТНОГО СКЛА ПРИ ЗГИННИХ ДЕФОРМАЦІЯХ

*Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України,  
вул. Пожарського, 2/10, 61046, Харків, Україна; e-mail: garm.nataly@gmail.com*

**Abstract.** The computational study of the crack resistance of sheet silicate glass, which is strengthened by ion exchange, under bending deformations is carried out. The calculation is carried out using a proprietary software package developed based on the finite element method for studying the thermos-stressed state of structures. The findings show that the destruction of the real sheet glass under the tensile stresses during bending is determined by the crack-like surface defects. If the depth of the zone of compressive stresses from ion strengthening is significantly less than the depth of the surface crack, the strength of the glass depends little on the maximum compressive stresses on the surface. The effect of the ionic hardening increases significantly in the case of a decrease in the depth of the surface crack. With the use of the developed method, it is possible to solve the important practical problems of studying the destruction of the multilayer glazing of aircraft with internal defects and determining the optimal methods for eliminating such defects.

**Key words:** crack resistance, stress state, silicate glass, residual stress, surface layer defects, stress intensity factor.

#### Вступ.

До скління літальних апаратів, яке є відповідальним елементом конструкції, висувається цілий ряд різноманітних вимог, в основі яких лежать умови безпечної, надійної та тривалої експлуатації [18, 26]. Скління кабін літальних апаратів цивільної авіації має витримувати експлуатаційні статичні навантаження, які викликані різницею тисків у кабіні і зовні та роботою системи електрообігріву [24]. Також скління повинно витримати зіткнення із птахом визначеної ваги [18, 27]. До скління літальних апаратів військового призначення висуваються додаткові умови щодо їх куле- та ударостійкості. Експлуатаційні навантаження зазвичай викликають згинні деформації скла, які призводять в залежності від розмірів області навантаження до лінійного або нелінійного розподілу згинних напружень по товщині [25].

Для забезпечення необхідних параметрів міцності у структурі елементів конструкційної оптики широко використовується силікатне скло, яке зміцнюється за спеціальними технологіями. Істотним чином міцність силікатного скла залежить від наявності поверхневих дефектів, які визначаються способом виробництва, технологіями, що застосовуються, умовами транспортування та зберігання [28]. Наявність поверхневих дефектів мікроскопічних розмірів у склі, складність методів їх контролювання призводить до суттєвої невизначеності стану поверхневого шару, що в результаті дає значний розкид у значеннях міцності скла. Механізми зміцнення скла (іонний обмін (ІО), термозміцнення, хімічне травлення, полірування) дозволяють зменшити цей негативний вплив поверхневих дефектів за рахунок штучного створення залишкових стискаючих напружень у склі та зменшення товщини пошкодженого шару.

Недостатня міцність елементів авіаційного скління, складність методів контролю поверхневих дефектів мікроскопічних розмірів у склі при виробництві і експлуатації та необхідність достовірної оцінки впливу штучно створених залишкових напружень на загальну величину підвищення міцності скла потребують розробки нових підходів і технічних рішень для розвитку сучасних технологій створення конструкцій. При цьому виникає необхідність достовірної оцінки напружено-деформованого стану елементів конструкцій з урахуванням реальних граничних умов та умов навантаження [11, 12, 23]. У даній роботі використовується розроблена на основі методу скінчених елементів методика розрахунку та програмний комплекс, які дозволяють досліджувати термонапружений стан елементів із урахуванням конструктивних особливостей [22].

Міцність скла при розтягуючих деформаціях значно менша, ніж при стискаючих. Причиною цього є поверхневі тріщини невеликого розміру. Скло – дуже крихкий матеріал, який руйнується без помітних пластичних деформацій шляхом розтріскування. Критична величина коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{IC}$ , яка являється мірою тріщиностійкості матеріалу, знаходиться для звичайного скла в межах  $0,4 - 0,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , що у сто разів менше, ніж для сталі. Тому навіть дуже малі тріщини знижують міцність скла.

Слід зазначити, що мікроскопічні дефекти на поверхні скла (мікротріщини) наявні навіть у його вихідному стані. Скло має специфічний поверхневий тріщинуватий шар, обумовлений процесом виготовлення. Він утворюється при охолодженні флоат-скла, пресуванні деталей або витягуванні прутків і волокон. В умовах експлуатації він змінюється за рахунок модифікації існуючих дефектів і утворення нових мікротріщин [17, 29]. Нерівномірний характер дефектності внаслідок дії різного роду технологічних і експлуатаційних факторів призводить до того, що для технічного скла границя міцності при дії напружень розтягу може коливатися в широкому діапазоні і становити від 10 МПа до 3000 МПа.

Зменшення дефектності поверхневого шару шляхом механічної обробки [10] та травлення [1], а також створення залишкових напружень стиску, які сповільнюють розвиток дефектів у поверхневому шарі за рахунок термічної обробки та іонного обміну, є ефективними методами підвищення міцності скла [15, 16, 19, 21, 30].

Метод хімічного зміцнення на основі ІО набуває все більш широкого застосування на практиці і все частіше використовується як альтернатива термічному зміцненню. Він полягає у витисненні в тонкому поверхневому шарі скла іонів натрію іонами калію або літію та створенні, за рахунок цього, в приповерхневій зоні напружень стиску. На поверхні вони приймають максимальні значення і швидко спадають по товщині. Ці стискаючі залишкові напруження закривають поверхневі тріщини шляхом контакту берегів [2, 4]. Характер розподілу залишкових напружень для іонного та термічного процесів зміцнення значно відрізняється, що призводить до різного рівня підвищення міцності зразків і змінює характер руйнування скла. Величина залишкових напружень стиску при застосуванні ІО значно перевищує аналогічні значення при термічному зміцненні, а глибина шару з залишковими напруженнями стиску значно менша. На рис. 1 наведено схематичне зображення розподілу напружень стиску по товщині термічно- та хімічнозміцненого флоат-скла [14, 17]. Глибина шару з залишковими напруженнями стиску у загартованому склі (суцільна параболічна крива) становить приблизно 21% від товщини скла. Глибина цього шару для ІО-скла (пунктирна лінія) є значно меншою і залежно від режиму зміцнення складає 20...100 мкм. Максимальні залишкові напруження розтягу у внутрішніх шарах термічно зміцненого скла складають біля 50% від максимального рівня напружень стиску на поверхні. У загартованому склі вони досягають 50...70 МПа, що призводить при руйнуванні конструкційних елементів до утворення дрібних осколків та суттєвої втрати несучої здатності конструкцій. Залишкові напруження розтягу у внутрішніх шарах скла, що відповідають залишковим напруженням стиску в поверхневих шарах для ІО-скла, є значно меншими – близько 20 МПа. Як наслідок, при рівні граничних напружень розтягу та

згину, характерних для термічно зміцненого скла, фрагментація елементів з хімічно зміцненого скла при їх крихкому руйнуванні відрізняється значно більшим розміром осколків і уламків, співрозмірних з аналогічними для елементів з незміцненого флоат-скла. При локальному статичному і ударному навантаженні твердими тілами характер руйнування поверхні ІО-скла є також наближеним до незміцненого скла, що дозволяє виконувати операції його розрізання та механічного оброблення елементів.

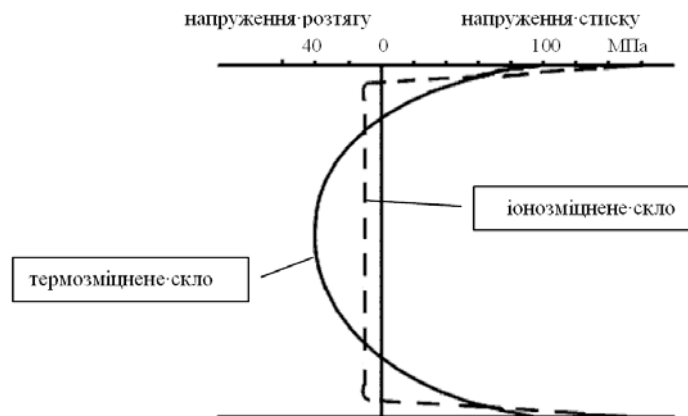


Рис. 1

Стандарт ASTM C 1422 – 99 [6] встановлює класифікацію ІО-скла відповідно до двох незалежних характеристик: залишкових напружень стиску та глибини зміцненого шару. Стандарт виділяє п'ять класів скла за рівнем напружень (із залишковими напруженнями стиску  $\sigma_{res}$  в діапазоні від 7 МПа до 172 МПа для 1-го класу та  $\sigma_{res} > 690$  МПа для 5-го класу) та шість класів за глибиною зміцненого шару (від величини  $\leq 50$  мкм для класу А та  $> 500$  мкм для класу F).

Зазвичай міцність зміцненого скла  $\sigma_s$  визначається на основі двох усереднених параметрів – міцності скла у вихідному стані  $\sigma_0$  та рівня залишкових напружень стиску  $\sigma_{res}$  за рівнянням [20]

$$\sigma_s = \sigma_0 + k\sigma_{res},$$

де  $k$  – емпіричний коефіцієнт, який визначається у більшості випадків експериментально.

Вплив іонного зміцнення на міцність скла в залежності від глибини та інтенсивності створення залишкових напружень все ще залишається недостатньо дослідженим і саме цьому питанню присвячена робота.

### §1. Постановка задачі.

Для дослідження впливу іонного зміцнення на загальне підвищення міцності скла розглядався зразок із листового силікатного скла товщиною 5 мм із наявним поверхневим дефектом [13].

Для малої поверхневої тріщини глибиною  $a$  коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини можна обчислити за формулою [3]

$$K_I = 1,99\sigma\sqrt{a}, \quad (1.1)$$

де  $\sigma$  – розтягуючі напруження.

Припустимо, що незміцнене силікатне скло руйнується при напруженні 35,5 МПа, що практично співпадає із середнім значенням міцності силікатного скла такої товщини. Для скла при  $K_{IC} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  критична глибина поверхневої тріщини, яка призводить до катастрофічного руйнування, дорівнює, згідно (1.1), 50 мкм.

Для описання напружено-деформованого стану скла при згині використаємо результати розв'язування задачі теорії пружності для випадку плоскої деформації [22]. Для моделювання методом скінченних елементів тріщиностійкості скла, зміцненого ІО, у декартовій системі координат  $r, O, z$  виділимо прямокутну область  $0 < r < 0,35$  мм,  $-0,001$  мм  $< z < 0,25$  мм. Поверхнева тріщина з вершиною в точці  $B$  глибиною 50 мкм розміщена вздовж осі  $r$  (рис. 2).

Нейтральна площина при згині листа описується рівнянням  $r = 0,25$  мм. Сторона області  $z = 0,25$  мм переміщується в напрямку осі  $z$  по закону прямої нормалі до нейтральної площини:  $u_z(0,25) = 0$ ;  $u_z(0) = 0,0013 P$  (мм), де параметр навантаження  $P$  приймає значення 1, 2, 3. Матеріал скла має наступні характеристики: питома вага  $\rho = 2,52$  г/см<sup>3</sup>, модуль пружності  $E = 68$  ГПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,22$ , коефіцієнт лінійного температурного розширення  $\alpha = 1,14 \cdot 10^{-5}$  (°C)<sup>-1</sup>, який використовується для моделювання залишкових напружень за допомогою температурних деформацій  $\varepsilon_T(r) = \alpha \cdot T(r)$ .

На стороні  $z = -0,001$  мм мають місце граничні умови симетрії  $u_z = 0$ ;  $\tau_{rz} = 0$ . Стискаючі напруження величиною  $\sigma_z = \alpha ET / (1 - \nu) = 200$  МПа є результатом іонного зміцнення поверхневого шару, на глибині 30 мкм в точці  $A$  (рис. 2) спадають до нуля, забезпечуючи контактування берегів поверхневої тріщини. Відрізок  $OB$  на рис. 2 відповідає глибині вихідної тріщини, а  $OA$  – області дії стискаючих напружень, де є можливим часткове контактування берегів тріщини. Для моделювання цього феномену в області  $OA$  вводяться 6 контактних елементів.

Оскільки в іонозміцненому склі товщина шару стискаючих напружень надзвичайно мала (30 мкм), застосовується спрощене описання закономірності їх зміни по товщині, як показано на рис. 3. Використовуються лінійна (рис. 3, а) та білінійна закономірності (рис. 3, б), які наближено описують параболічний закон розподілу напружень в області стиску.

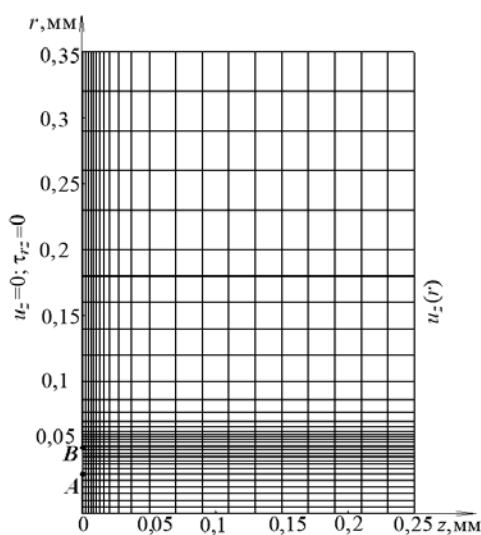


Рис. 2

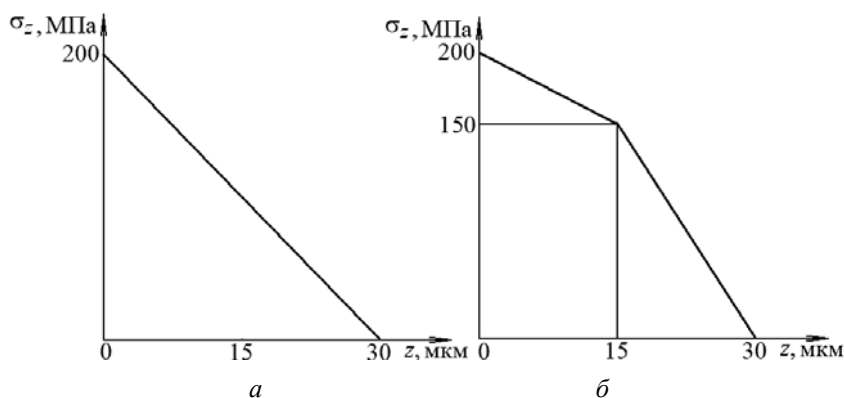


Рис. 3

При параметрі навантаження  $P=1$  згинні напруження на поверхні незміцненого скла складають близько 35,5 МПа, при  $P=2$   $\sigma_u = 71$  МПа.

Дискретизація області на скінченні елементи зображена на рис. 2, а в районі тріщини – на рис. 4. Розмір скінченних елементів у районі вершини тріщини складає 2 мкм. Коефіцієнт інтенсивності напружень можна оцінити за співвідношенням [3]

$$K_{II} = \sigma_z \sqrt{2\pi r_i}, \quad (1.2)$$

де  $r_i$  – відстань від вершини тріщини до центрів скінченних елементів, що знаходяться на продовженні тріщини. При даній дискретизації  $r_i = 1, 3, 5, 7, 9$  мкм.

Слід зазначити, що вершина тріщини є особливою точкою і тому на перших кількох скінченних елементах від вершини спостерігається різке зменшення напружень. Саме тому для обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень на практиці використовуються результати, отримані для третього та четвертого скінченних елементів від вершини тріщини, при цьому коефіцієнти інтенсивності напружень усереднюються [5].

У табл. 1 наведено результати розрахунку напружень  $\sigma_{zi}$ , коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$ , обчислений за формулою (1.2), а також величина напіврозкриття тріщини на поверхні в незміцненому склі (іонне зміцнення скла відсутнє). Тут  $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}, \sigma_{z3}, \sigma_{z4}$  – напруження  $\sigma_z$  в 1 – 4 скінченних елементах від вершини тріщини

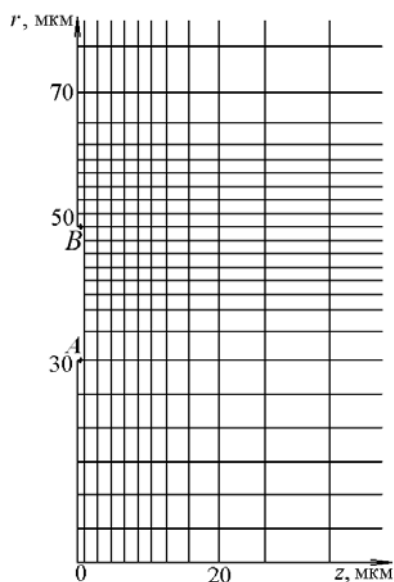


Рис. 4

(точка B). З таблиці видно, що для незміцненого скла коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  при  $P=1$  є дещо більшим від значення  $0,5 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  за рахунок похибки обчислень методом скінченних елементів. У результаті можна стверджувати, що навантаження з параметром  $P=1$  є практично найбільшим навантаженням, що може витримати незміцнене скло.

Таблиця 1

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Напіврозкриття берегів на поверхні ( $r=0$ ) $u_z$ , мкм
$P=1$	258,4	115,8	91,5	77,8	0,514	0,0695
$P=2$	510,9	231,6	183	155,6	1,029	0,1391
$P=3$	775,3	347,4	274,5	233,4	1,543	0,2087

Таблиця 2

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	$\sigma_z(r=0)$ , МПа	Контакт берегів тріщини
$P=1$	$\frac{118,8}{110,6}$	$\frac{56,5}{53,1}$	$\frac{49,1}{46,6}$	$\frac{44,8}{42,9}$	$\frac{0,271}{0,244}$	$\frac{-27,1}{-30,2}$	$\frac{z < 24 \text{ мкм}}{z < 27 \text{ мкм}}$
$P=2$	$\frac{282,8}{262,6}$	$\frac{132,4}{124,1}$	$\frac{111,9}{105,9}$	$\frac{100,2}{95,6}$	$\frac{0,612}{0,614}$	$\frac{-17,3}{-21,3}$	$\frac{z < 15 \text{ мкм}}{z < 20 \text{ мкм}}$
$P=3$	$\frac{497,1}{439,4}$	$\frac{229,4}{205,2}$	$\frac{189,9}{172,5}$	$\frac{167,5}{154}$	$\frac{1,087}{0,994}$	$\frac{0}{-10,1}$	$\frac{-}{z < 11 \text{ мкм}}$

Для іонозміцненого скла результати розрахунку наведено в табл. 2. У чисельнику знаходяться результати розрахунків для лінійного закону розподілу стискаючих на-

пружень при іонному зміцненні скла, а в знаменнику – для білінійного. У шостому стовпчику таблиці приведено коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини, у сьомому – величина контактних стискаючих напружень берегів тріщини біля поверхні  $r=0$ , в останньому стовпці – розмір зони контакту берегів тріщини.

Таким чином, при збільшенні параметра навантаженості збільшується коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини, а довжина контактної зони берегів тріщини зменшується. У випадку лінійного закону розподілу стискаючих напружень при  $P=3$  контакт берегів тріщини відсутній. При білінійному законі розподілу стискаючих напружень зона контактування берегів дещо більша, а коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини – менший. Параметр навантаження, при якому коефіцієнт інтенсивності напружень досягає критичного значення  $K_I = K_{IC} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  у випадку лінійного закону розподілу стискаючих напружень, становить  $P=1,65$ , а білінійного –  $P=1,7$ .

У випадку  $P=3$  при лінійному законі розподілу стискаючих залишкових напружень контакт берегів відсутній, а напіврозкриття берегів на поверхні  $u_z(0) = 0,0684 \text{ мкм}$ . Таким чином, при іонному зміцненні береги тріщини частково контактують, а у випадку відсутності контакту розкриття берегів значно зменшується. Однак в іонозміцненому склі при глибині тріщин 50 мкм його руйнування здійснюється раніше, ніж досягається розкриття берегів тріщини на поверхні скла.

Розглянемо випадок збільшення стискаючих напружень у іонозміцненому склі в 1,5 рази (до 300 МПа) на поверхні  $z=0$  при лінійному (рис. 5, а) і білінійному (рис. 5, б) законах розподілу залишкових напружень. Результати розрахунків наведено в табл. 3. У чисельнику приведено значення при лінійному законі розподілу стискаючих напружень, а в знаменнику – при параболічному законі.

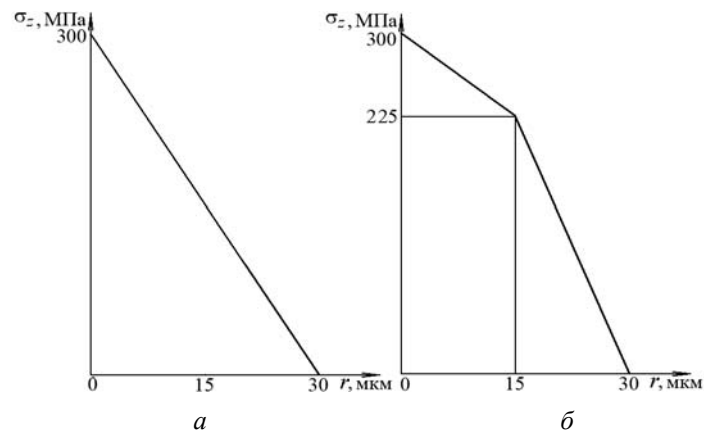


Рис. 5

Таблиця 3

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	$\sigma_z (r=0)$ , МПа	Контакт берегів тріщини
$P=1$	$\frac{105,7}{97,0}$	$\frac{50,8}{47,1}$	$\frac{45,0}{42,3}$	$\frac{41,6}{39,5}$	$\frac{0,264}{0,248}$	$\frac{-45,1}{-49,6}$	$\frac{r < 27,5 \text{ мкм}}{r < 28 \text{ мкм}}$
$P=2$	$\frac{255,3}{238,6}$	$\frac{120,8}{113,9}$	$\frac{103,6}{98,7}$	$\frac{93,8}{90}$	$\frac{0,601}{0,575}$	$\frac{-33,4}{-40,7}$	$\frac{r < 21 \text{ мкм}}{r < 23 \text{ мкм}}$
$P=3$	$\frac{424,2}{393,9}$	$\frac{198,6}{186,1}$	$\frac{167,8}{158,9}$	$\frac{150,4}{143,4}$	$\frac{0,96}{0,92}$	$\frac{-26,1}{-32,0}$	$\frac{r < 14 \text{ мкм}}{r < 11 \text{ мкм}}$

При цьому суттєво збільшуються контактні напруження берегів тріщини і незначно зростає зона їх контакту. Несуттєво зменшується і коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини. Параметр навантаження скла, при якому відбувається руйнування ( $K_I = K_{IC} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ), у випадку лінійного закону розподілу стискаючих напружень становить  $P=1,7$ , а білінійного –  $P=1,8$ .

Таким чином, коли глибина тріщини перевищує глибину зони стискаючих напружень від іонного зміцнення, навіть при значному збільшенні максимальних стискаючих напружень на поверхні, міцність скла зростає мало (до 7 %).

Для оцінки впливу дискретизації області на скінченні елементи на точність отриманих результатів були виконані розрахунки при більш детальній дискретизації, коли розміри мінімальних скінченних елементів у районі вершини тріщини в 2 рази менші, як зображено на рис. 6, а; відповідні результати для випадку зі стискаючими напруженнями на поверхні  $z = 0$  300 МПа приведено в табл. 4.

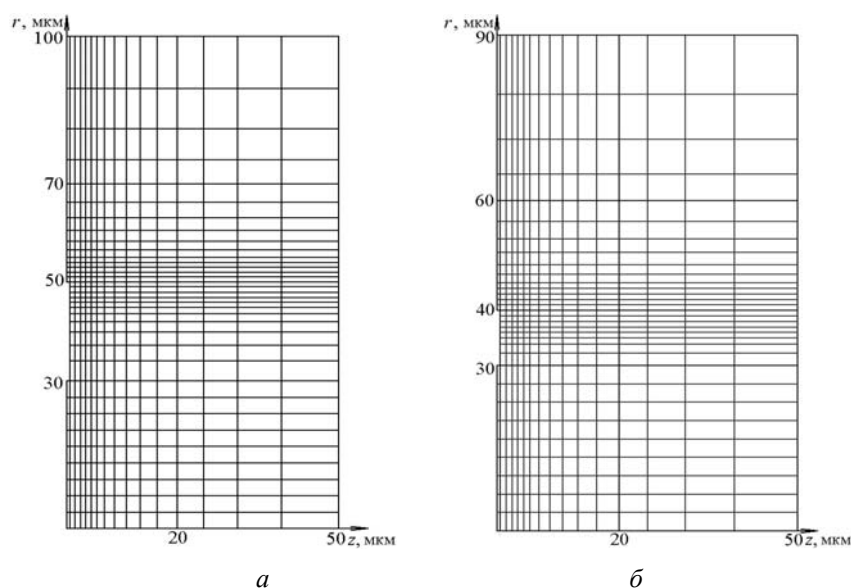


Рис. 6

Таблиця 4

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	$\sigma_z (r=0)$ , МПа	Контакт берегів тріщини
$P=1$	$\frac{145,9}{133,9}$	$\frac{66,5}{61,3}$	$\frac{56,0}{52,0}$	$\frac{49,8}{46,8}$	$\frac{0,228}{0,213}$	$\frac{-46,9}{-51,2}$	$\frac{r < 26,5 \text{ мкм}}{r < 28 \text{ мкм}}$
$P=2$	$\frac{353,7}{331,3}$	$\frac{160,8}{151,1}$	$\frac{132,4}{125,2}$	$\frac{116,2}{110,4}$	$\frac{0,534}{0,507}$	$\frac{-37,9}{-42,4}$	$\frac{r < 20 \text{ мкм}}{r < 22,5 \text{ мкм}}$
$P=3$	$\frac{590,5}{548,4}$	$\frac{267,4}{249,3}$	$\frac{218,1}{204,6}$	$\frac{190}{179,1}$	$\frac{0,878}{0,825}$	$\frac{-27,5}{-33,1}$	$\frac{r < 13 \text{ мкм}}{r < 19 \text{ мкм}}$

При цьому відстань від вершини тріщини до центрів скінченних елементів  $r_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$  приймає значення 0,5; 1; 1,5; 2, тому напруження  $\sigma_{z1}$  значно зростають при наближенні до вершини тріщини, а коефіцієнти інтенсивності напружень у вершині тріщини зменшуються за рахунок уточнення результатів. Коефіцієнти навантаження, при яких починається руйнування скла ( $K_I = K_{IC} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ), зростають на

8÷10 % і дорівнюють, відповідно,  $P=1,9$  і  $P=1,96$  (лінійний і параболічний закони розподілу стискаючих напружень). Таким чином, міцність іонозміцненого скла зростає приблизно у 2 рази.

Ефект від іонного зміцнення суттєво збільшується, якщо провести попереднє полірування поверхні скла, щоб зменшити глибину тріщини хоча б до 40 мкм. При глибині тріщини 40 мкм і уточненій дискретизації на скінченні елементи у районі вершини тріщини (рис. 6, б) результати розрахунку іонозміцненого скла зі стискаючими напруженнями на поверхні  $z = 0$  300 МПа приведено в табл. 5. У чисельнику наведено значення при лінійному законі розподілу стискаючих напружень, в знаменнику – при білінійному законі (рис. 5).

Таблиця 5

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{м}$	$\sigma_z (r=0)$ , МПа	Контакт берегів тріщини
$P=1$	$\frac{93,8}{79,2}$	$\frac{44,6}{38,2}$	$\frac{40,0}{35,2}$	$\frac{37,3}{33,4}$	$\frac{0,167}{0,148}$	$\frac{-47,1}{-51,4}$	$\frac{r < 25,1 \text{ мкм}}{r < 29 \text{ мкм}}$
$P=2$	$\frac{258,8}{233,9}$	$\frac{121,2}{110,6}$	$\frac{103,6}{95,8}$	$\frac{93,5}{87,4}$	$\frac{0,424}{0,395}$	$\frac{-38,7}{-43,1}$	$\frac{r < 24,5 \text{ мкм}}{r < 25 \text{ мкм}}$
$P=3$	$\frac{453,3}{408,7}$	$\frac{210}{191,2}$	$\frac{176,1}{162,3}$	$\frac{156,8}{145,8}$	$\frac{0,716}{0,664}$	$\frac{-29,5}{-34,4}$	$\frac{r < 15,1 \text{ мкм}}{r < 22 \text{ мкм}}$

У цьому випадку параметр навантаження, при якому відбувається руйнування скла, досягає, відповідно,  $P=2,3$  і  $P=2,45$  (лінійний і білінійний закони розподілу стискаючих напружень). Таким чином, при розмірі поверхневої тріщини  $l = 40$  мкм за рахунок іонного зміцнення міцність скла зростає приблизно у 2,5 рази.

Виконано розрахункові дослідження для тріщини глибиною 30 мкм. Стискаючі напруження в іонозміцненому склі прийняті згідно рис. 5. Мінімальний розмір скінченного елемента в районі вершини тріщини становить 1 мкм. Одержані результати приведено в табл. 6. У чисельнику наведено значення при лінійному законі розподілу стискаючих напружень, в знаменнику – при білінійному законі (рис. 5).

Таблиця 6

Параметр навантаження	$\sigma_{z1}$ , МПа	$\sigma_{z2}$ , МПа	$\sigma_{z3}$ , МПа	$\sigma_{z4}$ , МПа	$K_I$ , МПа $\sqrt{м}$	$\sigma_z (r=0)$ , МПа	Контакт берегів тріщини
$P=1$	$\frac{21,6}{3,2}$	$\frac{16,3}{7,3}$	$\frac{20,2}{13,4}$	$\frac{22,1}{16,6}$	$\frac{0,092}{0,05}$	$\frac{-46,9}{-52,2}$	$\frac{r < 29 \text{ мкм}}{r < 30 \text{ мкм}}$
$P=2$	$\frac{129,5}{94,8}$	$\frac{73,0}{59,1}$	$\frac{69,9}{60,2}$	$\frac{68,1}{60,6}$	$\frac{0,298}{0,261}$	$\frac{-38,9}{-43,2}$	$\frac{r < 23,3 \text{ мкм}}{r < 26,6 \text{ мкм}}$
$P=3$	$\frac{270,6}{215,4}$	$\frac{141,8}{120,0}$	$\frac{127,4}{112,5}$	$\frac{119,7}{108,4}$	$\frac{0,533}{0,477}$	$\frac{-30,6}{-35,0}$	$\frac{r < 20 \text{ мкм}}{r < 23,3 \text{ мкм}}$

Параметр навантаження, при якому відбувається руйнування скла, для цього випадку становить, відповідно, для лінійного та білінійного законів розподілу стискаючих напружень  $P=2,9$  і  $P=3,15$ . Отже, коли поверхнева тріщина має глибину  $l = 30$  мкм, за рахунок іонного зміцнення міцність скла зростає приблизно у 3 рази.

### Висновок.

Промодельовано тріщиностійкості листового скла, зміцненого ІО, при згинних деформаціях методом скінченних елементів. Застосовано власний пакет програм, який дозволяє досліджувати термонапружений стан конструкцій із урахуванням особливостей побудови та реальних умов експлуатації [22].

Встановлено, що руйнування реального листового скла від розтягуючих напружень при згині обумовлене тріщиноподібними поверхневими дефектами. Створення



залишкових стискаючих напружень до 300 МПа на поверхні скла у тонкій зоні (близько 30 мкм) поверхневих шарів, яке одержується шляхом іонообмінного зміцнення, забезпечує приріст міцності при згині приблизно в три рази. При збільшенні величини залишкових напружень і глибини їх розподілу ефект від іонообмінної обробки збільшується. Глибина поверхневих тріщин, виходячи з реальної міцності листового скла 35,7 МПа, досягає близько 50 мкм, що перевищує товщину шару стискаючих напружень, які забезпечують контакт берегів тріщини.

У випадку відсутності залишкових стискаючих напружень при навантаженні згинном ( $P=1$ , розтягуючі напруження на поверхні 35,7 МПа,  $K_I = K_{IC} = 0,514 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ), скло руйнується.

Якщо глибина зони стискаючих напружень від іонного зміцнення значно менша глибини поверхневої тріщини, міцність скла мало залежить від максимальних стискаючих напружень на поверхні. Ефект від іонного зміцнення суттєво зростає у випадку зменшення глибини поверхневої тріщини.

Враховуючи неоднорідність залишкових напружень при іонообмінному зміцненні, розкид реальних значень  $K_{IC}$  для скла, проведення розрахунків для одиночної тріщини в двовимірній постановці та ін., одержані результати мають швидше якісний, аніж кількісний характер, потребують проведення подальших досліджень та порівняння із експериментальними даними.

**РЕЗЮМЕ.** Досліджено тріщиностійкість листового силікатного скла, яке зміцнене іонним обміном, при згинних деформаціях із використанням власного пакета програм, розробленого з використанням методу скінченних елементів для дослідження термонапруженого стану конструкцій. Одержані результати показали, що руйнування реального листового скла від розтягуючих напружень при згині визначається тріщиноподібними поверхневими дефектами. Якщо глибина зони стискаючих напружень від іонного зміцнення значно менша глибини поверхневої тріщини, міцність скла мало залежить від максимальних стискаючих напружень на поверхні. Ефект від іонного зміцнення суттєво зростає у випадку зменшення глибини поверхневої тріщини. За допомогою розробленої методики можна розв'язувати важливі практичні задачі про руйнування багатошарового скління літальних апаратів із внутрішніми дефектами й визначенню оптимальних методів усунення таких дефектів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** тріщиностійкість, напружений стан, силікатне скло, залишкове напруження, дефект поверхневого шару, коефіцієнт інтенсивності напружень.

1. *Бартев Г.М.* Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. – Москва: Стройиздат, 1974. – 240 с.
2. *Бартев Г.М.* Строение и механические свойства неорганических стекол. – Москва: Изд-во литературы по строительству, 1966. – 216 с.
3. *Броек Д.* Основы механики разрушения. – Москва: Высш. школа, 1980. – 386 с.
4. *Бутаев А.М.* Прочность стекла. Ионнообменное упрочнение. – Махачкала: ДГУ, 1997. – 130 с.
5. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И.* Расчет трещиностойкости элементов конструкций методом конечных элементов // Вестник НТУ «ХПИ». Динамика и прочность машин: Темат. вып. – 2005. – Вып. 21. – С. 127 – 132.
6. *ASTM C1422-99.* Standard specification for chemically strengthened flat glass. – West Conshohocken, PA, 1999. – 3 p.
7. *Bedon C.* Research developments on glass structures under extreme loads // Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures. Proc. XIV Int. Conf. on Metal Structures (ICMS 2021), Poznań, Poland. (Poznań, 16–18 June 2021). Routledge Taylor & Francis Group, 2021. – P. 3 – 13.
8. *Bedon C., Amadio C.* A unified approach for the shear buckling design of structural glass walls with non-ideal restraints // Amer. J. of Eng. and Appl. Sci. – 2016. – 9, N 1. – P. 64 – 78.
9. *Bez A., Bedon C., Manara G., Amadio C., Lori G.* Calibrated numerical approach for the dynamic analysis of glass curtain walls under spheroconical bag impact // Buildings. – 2021. – 11, N 4. – 154. – 28 p.

10. *Bos F.* The integrated approach to structural glass safety applied to glass beams // Challenging Glass 2: Proc. Conf. on Architectural and Structural Applications of Glass, TU Delft, Nederland. (Delft, 20–21 May 2010). – TU Delft, 2010. – P. 297 – 308.
11. *Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Zakhariichenko L.I.* Analysis of Influence of the Geometrical Parameters of Elliptic Cylindrical Shells with Variable Thickness on their Stress-Strain State // Int. Appl. Mech. – 2018. – **54**, N 2. – P. 155 – 162.
12. *Grigorenko A.Ya., Pankrat'ev S.A., Yaremchenko S.N.* Analysis of the Stress-Strain State of Complex-Shaped Plates // Int. Appl. Mech. – 2018. – **54**, N 6. – P. 695 – 701.
13. *Hontarovskiy P.P., Smetankina N.V., Ugrimov S.V., Garmash N.G., Melezhyk I.I.* Numerical investigations of the crack resistance of ion exchange strengthened sheet glass under flexural deformations // J. of Mech. Engng. – 2021. – **24**, N 3. – P. 45 – 51.
14. *Karlsson S., Jonson B., Stålhandske C.* The technology of chemical glass strengthening – a review // Glass Technology: European J. of Glass Sci. and Technology. Part A. – 2010. – **51**, N 2. – P. 41 – 54.
15. *Macrelli G.* Chemically strengthened glass by ion exchange: Strength evaluation // Int. J. of Appl. Glass Sci. – 2018. – **9**, N 2. – P. 156 – 166.
16. *Mazzoldi P., Carturan S., Quaranta A., Sada C., Sglavo V.M.* Ion exchange process: history, evolution and applications // Rivista del Nuovo Cimento. – 2013. – **36**, N 9. – P. 397 – 450.
17. *Mognato E., Schiavonato M., Barbieri A., Pittoni M.* Process influences on mechanical strength of chemical strengthened glass // Glass Struct. and Engng. – 2016. – **1**, N 1. – P. 247 – 260.
18. *Rodichev Y.M., Smetankina N.V., Shupikov O.M., Ugrimov S.V.* Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load // Strength of Materials. – 2018. – **50**, N 6. – P. 868 – 873.
19. *Rodichev Y., Veer F., Soroka O., Shabetya O.* Structural strength of heat-strengthened glass // Strength of Materials. – 2018. – **50**, N 4. – P. 584 – 596.
20. *Schiavonato M., Mognato E., Redner A.S.* Stress measurement, fragmentation and mechanical strength // Glass Processing Days. Proc. 9th Inter. Conf. on Architectural and Automotive Glass, Tampere, Finland. (Tampere, 17–20 June 2005). – Tampere, 2005. – P. 92 – 95.
21. *Sglavo V.M.* Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO<sub>3</sub> bath // Int. J. of Appl. Glass Sci. – 2015. – **6**, N 1. – P. 73 – 82.
22. *Shul'zhenko M., Gontarovskiy P., Garmash N., Melezhyk I., Protasova T.* Thermostressed state and crack growth resistance of rotors of the NPP turbine K-1000-60/1500 // Strength of Materials. – 2010. – **42**, N 1. – P. 114 – 119.
23. *Shul'zhenko N.G., Zaitsev B.F., Asaenok A.V., Protasova T.V.* Deformation and vibration-induced stress intensity of a high-temperature turbine rotor with a breathing transverse crack // Strength of Materials. – 2017. – **49**, N 6. – P. 751 – 759.
24. *Shupikov A.N., Smetankina N.V., Svet Ye.V.* Nonstationary heat conduction in complex-shape laminated plates // Trans. ASME. – J. of Heat Transfer. – 2007. – **129**, N 3. – P. 335 – 341.
25. *Shupikov A.N., Ugrimov S.V., Kolodiazhny A.V., Yareschenko V.G.* High-order theory of multilayer plates. The impact problem // Int. J. Solids Struct. – 1998. – **35**, N 25. – P. 3391 – 3404.
26. *Shupikov A.N., Ugrimov S.V., Smetankina N.V., Yareschenko V.G., Onhirsky G.G., Ukolov V.P., Samoilenko V.F., Avramenko V.L.* Bird dummy for investigating the bird-strike resistance of aircraft components // J. of Aircraft. – 2013. – **50**, N 3. – P. 817 – 826.
27. *Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D.* Simulating the process of a bird striking a rigid target. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2020. – P. 711 – 721.
28. *Varshneya A.K.* Stronger glass products: Lessons learned and yet to be learned // Int. J. of Appl. Glass Sci. – 2018 – **9**, N 2. – P. 140 – 155.
29. *Veer F.A., Rodichev Yu.M.* Glass failure, science fiction, science fact and hypothesis // Glass Performance Days. Proc. 11th Inter. Conf. on Architectural and Automotive Glass, Tampere, Finland. (Tampere, 12–15 June 2009). – Tampere, 2009. – P. 819 – 823.
30. *Veer F.A., Rodichev Y.M.* Improving the engineering strength of heat strengthened glass // Heron. – 2017. – **61**, N 2. – P. 121 – 138.

Поступила 02.08.2021

Затверджена до друку 19.07.2022