

УДК 620.173; 303.732.4

Ю. Родічев¹, канд. техн. наук; О. Шабетя²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

²Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ»

АНАЛІЗ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ФАКТОРІВ ТА КЕРУВАННЯ ТРИМКІСТЮ СИСТЕМИ «АВІАЦІЙНЕ СКЛІННЯ» НА ОСНОВІ ЦІЛЕСПРЯМОВАНОГО ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ АДГЕЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ

Резюме. Сучасне скління кабін пілотів являє собою складну систему. Інтегративною властивістю системи є її несівна здатність та ресурс, які складним чином залежать від численних параметрів елементів підсистем та зв'язків між ними. Зв'язок підсистем силового блока та зовнішнього електрообігрівного шару здійснюється адгезійним шаром, який можна виділити в окрему підсистему. Показано, що цілеспрямований вибір параметрів адгезійного з'єднання дозволяє керувати крайовим ефектом та жорсткістю системи, що значною мірою визначає несівну здатність. На основі розв'язання лінійних диференціальних рівнянь другого порядку з постійними та змінними коефіцієнтами, отримано напруження в адгезійному контакті як функцію геометричних та фізико-механічних параметрів системи. Показано, що заміна постійного модуля пружності адгезиву модулем пружності, що змінюється по довжині композиції, при збереженні загальної жорсткості композиції, максимальне напруження зсуву в крайовій зоні композиту зменшується в 1,4 раза у порівнянні з максимальною величиною цього ж напруження для композиції з постійним модулем пружності прошарку. Отримані результати закладають основу для конструювання складної системи із листового скла, з'єданого адгезивом з керованими несівною здатністю та ресурсом на основі цілеспрямованого вибору параметрів системи.

Ключові слова: складна система, підсистеми, скління кабіни пілота, адгезійне з'єднання, крайовий ефект, модуль пружності, диференціальні рівняння, несівна здатність, ресурс.

Y. Rodichev, O. Shabetia

ANALYSIS OF THE DETERMINING FACTORS AND LOAD CARRYING CAPACITY CONTROL FOR "AIRCRAFT GLAZING" SYSTEM USING A PURPOSIVE CHOICE OF ADHESIVE JOINT PARAMETERS

Summary. The modern electric heated cockpit glazing is a complex system. Integrative properties of the system is its load carrying capacity and resources which in a complex manner dependent on many parameters of the subsystems and relations between them. Contact between subsystems is adhesive layer, which can be considered as a separate subsystem. Adhesive joints of load-carrying structures made of glass are characterized by a significant concentration of stresses at the edge. The absence of sufficiently proven solutions on how to reduce the edge effect restrains the development and use of adhesive joints. The parameters of electric heated cockpit glazing system that determine the adhesive strength and stiffness of the joint are identified. The solution of a linear differential equation of second order with constant coefficients allows obtaining shear stresses in adhesive contact as a function of geometrical, physical and mechanical parameters of the system. A new technical approach to control the stresses at the edge by directional change of the modulus of elasticity of adhesive layer in the edge zone is justified. On the example of the calculation of model of adhesive joint consisting of elements in the form of strips, joined by an adhesive layer, it is shown that the reduction of stress concentration at the edge of the adhesive contact with simultaneous keeping of the overall high rigidity of joint can be achieved by reducing the elastic modulus of adhesion layer next to the edge. The law of the elastic modulus changes is proposed to choose as a "mirror image" to the distribution of shear stresses at the joint with a constant elastic modulus of adhesive. Replacement of constant E_{ai} by functional dependence $E_{ai}=f(z)$ results in the differential equation coefficient becoming variable. Numerical solution of this equation allows to obtain shear stress distribution in the case of variable elastic modulus of interlayer: the maximum shear stress at the edge of composite with variable elastic modulus of interlayer decreased in 1,4 times compared with one, where

elastic modulus of interlayer is 1GPa, while the rigidity of composite is retained. The obtained results can be a basis for purposeful choice of cockpit glazing parameters to improve its carrying capacity and resource.

Key words: Complex system, subsystems, cockpit glazing, adhesive joint, edge effect, elastic modulus, differential equation, carrying capacity, resource.

Вступ. Авіаційне скління сучасних літаків являє собою складну систему. Цій системі притаманні майже всі види складності [1] – функціональна (збереження оптичних характеристик; обігрів з метою скидання льоду; система та її елементи виконують функції захисту екіпажу від впливу регулярних та випадкових екстремальних умов: перепад тиску, температура за бортом до -50°C , механічне навантаження, удар птахи) конструктивна (складна конструкція, елементами якої є шари скла та адгезиву різної товщини, габаритних розмірів та кривини) й технологічна (в основу системи покладено складні технології виготовлення виробу: вироблення якісного скла, формування блоків, нанесення електрообігрівного шару та системи обігріву, а також складні технології, що керують функціонуванням системи електрообігріву. Система «авіаційне скління» складається з підсистеми багат шарового силового блока і підсистеми електрообігрівного шару скла. Основою обох підсистем є багатфункціональні адгезійні з'єднання, які відрізняються за своєю конструкцією та фізико-механічними властивостями. Силовий блок формується на основі скла товстих номіналів та жорстких полімерних адгезійних прошарків, жорсткість яких забезпечується за рахунок підвищення модуля пружності та зменшення товщини адгезійних шарів. Підсистема електрообігрівного шару складається зі скла тонкого номіналу підвищеної термостійкості. Зв'язок підсистем здійснюється податливим адгезійним шаром для зменшення термомеханічних напружень в електрообігрівному шарі скла, який можна виділити в окрему підсистему (рис. 1). Податливість адгезійного з'єднання забезпечується керуванням геометричними та фізико-механічними параметрами.

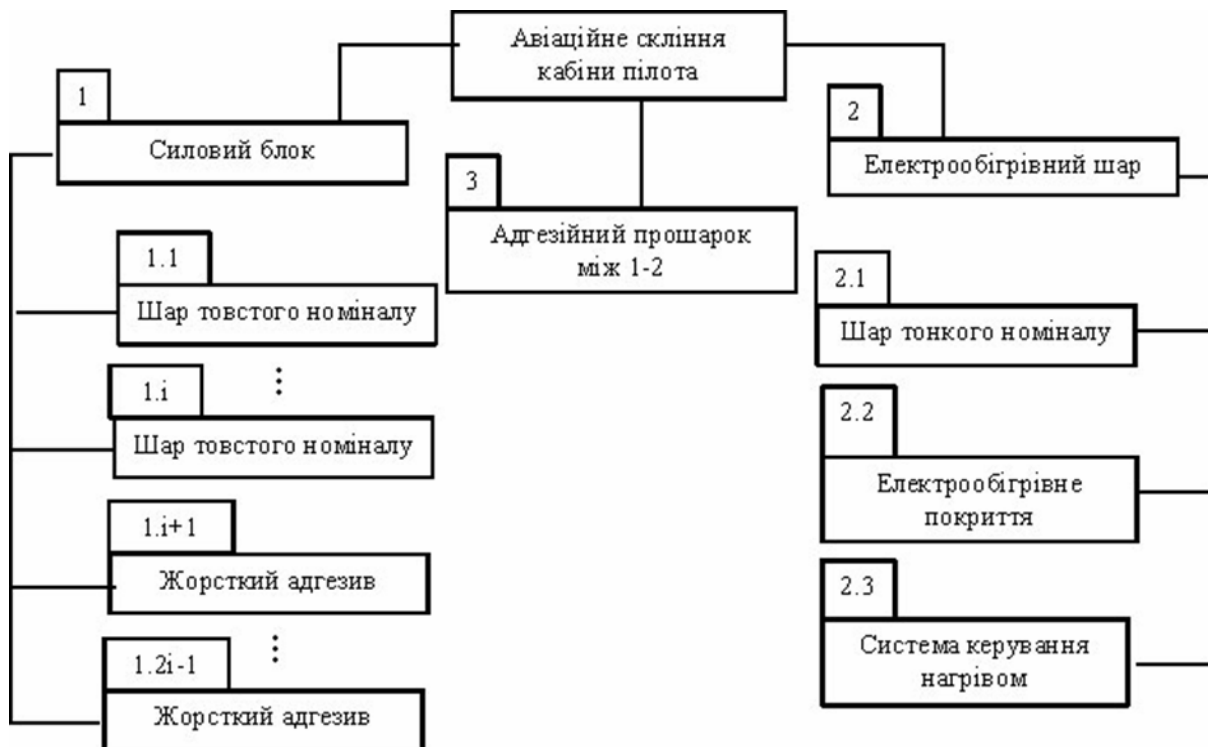


Рисунок 1. Ієрархічна структура системи «авіаційне скління кабіни пілота»

Figure 1. Hierarchical structure of "aircraft cockpit glazing"

Інтегративною властивістю системи є її несівна здатність та ресурс, які складним чином залежать від численних параметрів елементів підсистем та зв'язків між ними. Складність керування системою «авіаційне скління» підвищується внаслідок збільшення розмірів елементів системи та підвищення термосилового навантаження на систему зі збільшенням швидкостей та висоти польотів, а також підвищенням вимог до несівної здатності конструкції скління та наближення його до ресурсу металевих конструкцій фюзеляжу.

Ресурс системи «авіаційне скління» визначається значною кількістю факторів. Якщо ресурс визначити як функцію R , що потребує максимізації, то можна записати

$$\max R = f(H_i, h, \delta_i, E, E_{ai}, G, G_{ai}, \sigma_i, \tau_i, T, P_i), \quad (1)$$

де H_i, h, δ_i – товщини шарів силового блока, електрообігрівного шару та адгезійних прошарків; E, E_{ai}, G, G_{ai} – модулі пружності скла та адгезійних прошарків; σ_i, τ_i – границі міцності елементів скління та адгезійних прошарків; T, P_i – температурні та силові параметри навантаження.

Несівна здатність системи, що розглядається, потребує виділення та розв'язання окремих задач, серед яких – збереження адгезійної міцності та жорсткості системи на основі оптимального вибору параметрів з'єднання. Аналіз літературних джерел показує, що дані щодо дослідження крайового ефекту, а особливо методів керування цим ефектом в адгезійних з'єднаннях, дуже обмежені [2, 3]. Попередні роботи показали можливість керування напружено-деформованим станом у крайових зонах для склокераміки [4] та ламінованих елементів архітектурного скління [5].

Метою роботи є виділення та цілеспрямований вибір визначальних параметрів адгезійного з'єднання «силовий блок – електрообігрівний шар», які дозволять керувати несівною здатністю та ресурсом системи.

Аналіз умов експлуатації системи «авіаційне скління» показує, що навантаження передається від силової частини блока до електрообігрівного зовнішнього скла через адгезійний прошарок, у крайових областях спостерігається значна концентрація напружень. Крайовий ефект у такому з'єднанні призводить до відшарування в крайовій зоні, що й спостерігається при обстеженні елементів скління, які були зняті з експлуатації.

Це зумовило необхідність дослідження крайового ефекту в конструкції, яка складається зі скляних пластин та адгезійного прошарку. На прикладі розрахунку моделі адгезійного з'єднання елементів у вигляді смуг досліджено вплив конструкційних параметрів та модуля пружності з'єднання на крайовий ефект.

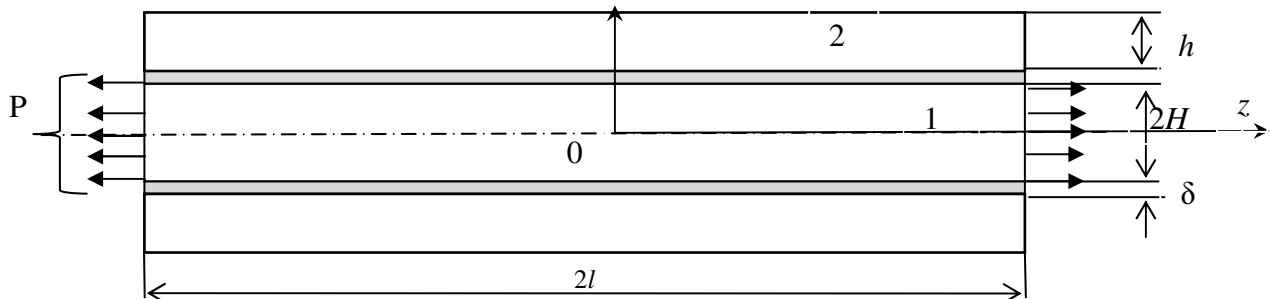


Рисунок 2. Схема навантаження адгезійного з'єднання

Figure 2. Scheme of loaded composite plate

Для модельного розрахунку була прийнята схема, де рівномірне зусилля розтягу P

прикладене лише до кінців центрального елемента композиції (рис. 2). $2H$, h та δ – товщина шарів скла і прошарку. Довжина композиції $2l$. Початок координат обрано в середній точці, як це зображено на рисунку. Вісь Z – вісь поздовжньої симетрії композиції. При розв’язанні задачі нами були проаналізовані дотичні напруження на поверхні адгезійного контакту. Внаслідок симетрії розглядали половину композиції (над віссю Z).

Виходячи з того, що елементи системи знаходяться в рівновазі, й, беручи до уваги, що в поперечному перерізі $Z = 0$ дотичні напруження $\tau = 0$, отримаємо [4] лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами для $w(z)$ – різниці величин осевого зміщення центра ваги зовнішньої – 2 та внутрішньої – 1 смужок скла.

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - k^2 w(z) = 0. \quad (2)$$

Тут k – коефіцієнт, який залежить від пружних характеристик (коефіцієнта Пуассона, модуля Юнга смужок E_1 , E_2 та адгезійного прошарку E_{ai} , а також від геометричних параметрів елементів композиції.

$$k^2 = \frac{\left(\frac{1}{E_1 H} + \frac{1}{E_2 h} \right)}{(1 + \mu) \left[\frac{2\delta}{E_{ai}} + \frac{h}{E_2} + \frac{H}{E_1} \right]}. \quad (3)$$

Аналітичний розв’язок $w(z)$ рівняння (2) та подальше використання співвідношення [4] між дотичними напруженнями та різницею величин осевого зміщення центра ваги зовнішньої та внутрішньої смужок скла, дозволяє отримати

$$\tau = \frac{P}{F_1} \frac{E_1}{(1 + \mu) H k} \frac{sh kz}{\left(\frac{2E_1}{H} \left(\frac{\delta}{E_{ai}} + \frac{h}{E_2} \right) + 1 \right) ch kl}, \quad (4)$$

де F_1 – площа поперечного перерізу внутрішньої смужки;

$\sigma_t = \frac{P}{F_1}$ – нормальне напруження в умовах розтягу.

Використовуючи рівняння (3), (4), проаналізовано залежність між відношенням напруження зсуву на поверхні адгезійного контакту до номінального нормального напруження (в подальшому називаємо відносним напруженням зсуву τ/σ_t) та мадулями Юнга скла і адгезиву, а також довжини композиції $2l$ і товщини шарів ($2H$, h і δ).

Формула (4) дозволяє отримати розподіл напружень зсуву уздовж поверхні адгезійного контакту. Основні фізичні та геометричні параметри елементів адгезійних з’єднань, що аналізуються (рис. 2), наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізичні й геометричні параметри елементів адгезійних з’єднань

Параметри елементів з’єднання	Значення параметрів елементів з’єднання
Товщина скляного шару 1 ($2H$), мм	12, 6, 2
Товщина скляного шару 2 (h), мм	6, 3, 1
Товщина адгезійного шару (δ), мм	4, 1, 0.37, 0.1, 0.01
Довжина композиції, мм	1000, 400, 200

Модуль Юнга скла E , ГПа	70
Модуль Юнга адгезиву E_{ai} , ГПа	70, 10, 5, 1, 0.1, 0.01,

Приклади розрахункового розподілу відносних дотичних напружень τ/σ_t при $H = h = 6$ мм; $\delta = 0,37$ мм; $E_{ai} = 1$ ГПа для композицій різної довжини наведено на рис. 3. Як впливає з аналізу кривих 1 – 3, максимальна величина відносних дотичних напружень не залежить від довжини з'єднання, а ступінь локалізації напружень значною мірою пов'язана з довжиною композиції: в коротких з'єднаннях зона, де дотичні напруження істотні за величиною, порівняна з довжиною композиції, в той час як для довгих з'єднань значні за величиною напруження локалізовані в крайовій зоні, а в центральній частині композиції напруження зсуву практично відсутні.

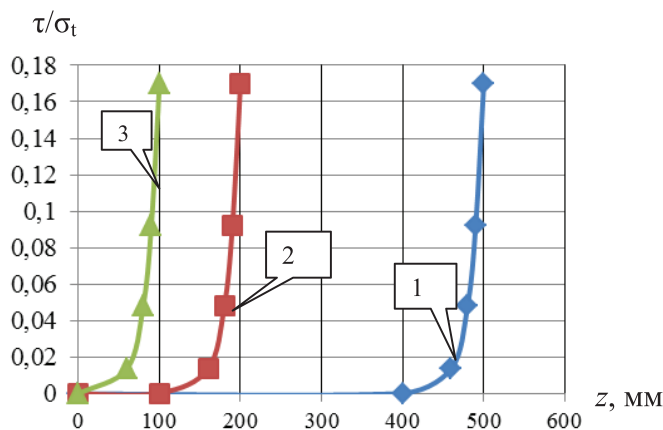


Рисунок 3. Розподіл відносних напружень зсуву вздовж інтерфейсу для композиту
 $H = h = 6$ мм; $\delta = 0,37$ мм; $E_{ai} = 1$ ГПа;
 2l: 1 – 1 м, 2 – 0,4 м, 3 – 0,2 м

Figure 3. Distribution of relative shear stresses lengthwise interface for composites with
 $H = h = 6$ mm; $\delta = 0,37$ mm;
 $E_{ai} = 1$ GPa and 2l: 1 – 1 m,
 2 – 0,4 m, 3 – 0,2 m

Також досліджено залежність концентрації дотичних напружень від модуля пружності адгезійного прошарку. Розрахунки проведено для композиції довжиною 1 м (рис. 4, 5). Модуль пружності адгезійного прошарку E_{ai} змінювався в межах від 0,01 ГПа до 70 ГПа. Як показано на рис. 4, зростання модуля пружності E_{ai} від 0.01 ГПа до 1 ГПа призводить до збільшення дотичних напружень в 8,5 раза. Спостерігається також значне зростання концентрації напружень. Крайовий ефект локалізується в області до 100 мм. Біля 80% адгезійного прошарку взагалі не навантажено дотичними напруженнями. Застосування адгезивів із низькою жорсткістю призводить до більш рівномірного розподілу напружень, але це також призводить як до незадовільного з'єднання несівних структурних компонентів композиції, так і до зниження міцності та жорсткості деталі зі скла в цілому.

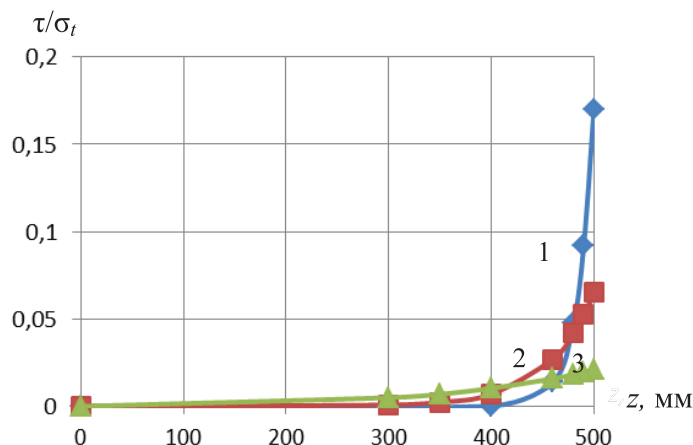


Рисунок 4. Залежність концентрації відносних дотичних напружень від модуля пружності

адгезиву для композиції довжиною $2l=1\text{ м}$, $H=6\text{ мм}$, $h=6\text{ мм}$, $\delta=0.37\text{ мм}$;
 1 – $E_{ai}=1\text{ ГПа}$, 2 – $E_{ai}=0,1\text{ ГПа}$, 3 – $E_{ai}=0,01\text{ ГПа}$

Figure 4. Dependence of edge shear stress concentration on elastic modulus of adhesive for a composite plate with the length 1 м , $H=6\text{ мм}$, $h=6\text{ мм}$, $\delta=0.37\text{ мм}$;
 1 – $E_{ai}=1\text{ ГПа}$, 2 – $E_{ai}=0,1\text{ ГПа}$, 3 – $E_{ai}=0,01\text{ ГПа}$

Зростання модуля Юнга адгезійного прошарку до 10 ГПа призводить до зростання крайових напружень приблизно в $1,5$ рази. Подальше збільшення E_{ai} спричиняє стабілізацію величин відносних напружень зсуву до рівня $0.27 \dots 0.3$ (рис. 5).

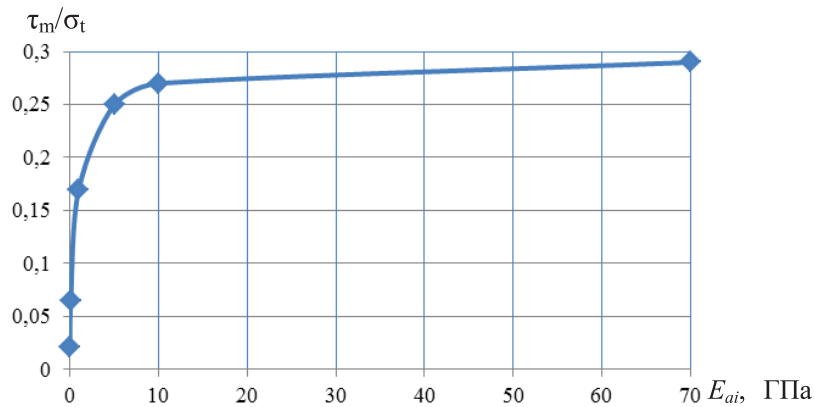


Рисунок 5. Кореляція між максимальним відносним напруженням зсуву (в крайовій зоні) та модулем пружності адгезійного прошарку

Figure 5. Correlation between relative shear stress at the edge of composition and Young's modulus of adhesive interlayer

Таким чином, показано, що керувати рівнем дотичних напружень в крайовій зоні в межах $0.02 < \tau/\sigma_t < 0.27$ та конструкційною міцністю адгезійних з'єднань зі скла можна, змінюючи модуль Юнга адгезиву в межах $0,01 \dots 10\text{ ГПа}$.

Результати аналізу впливу товщини пластин на концентрацію дотичного напруження наведено на рис. 6. Для розрахунку були прийняті такі параметри композиції: $E_{ai}=1\text{ ГПа}$, $\delta=0.37\text{ мм}$, $l=500\text{ мм}$, $H=6\text{ мм}$. Товщина h зовнішнього шару скла 2 приймалася 1 мм , 3 мм та 6 мм . Максимальна величина дотичного напруження на краю з'єднання зменшилась у $1,5$ рази, коли товщина зменшилась з 6 мм до 2 мм . Довжина напруженої крайової зони зменшилась до 40 мм . Чим менше товщина h , тим менше дотичне напруження в крайовій зоні.

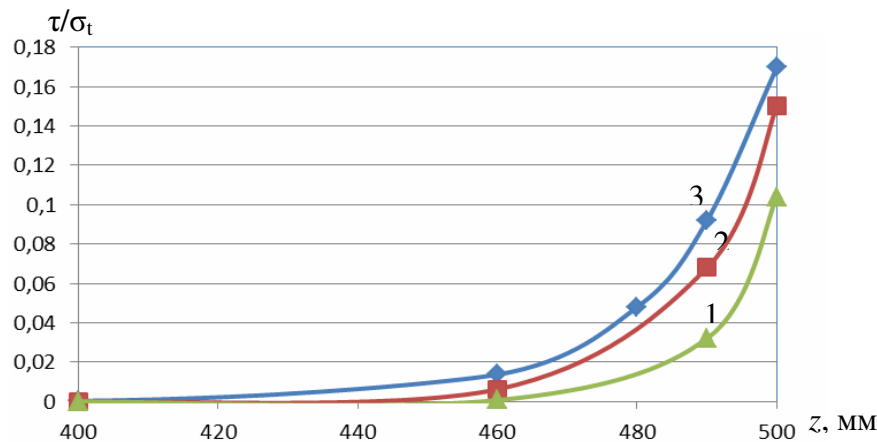


Рисунок 6. Розподіл дотичних напружень у зоні інтерфейсу для різних товщин зовнішньої скляної пластини 2: $E_{ai}=1\text{ ГПа}$, $\delta=0.37\text{ мм}$, $l=500\text{ мм}$, $H=6\text{ мм}$, 1- $h=1\text{ мм}$, 2- $h=3\text{ мм}$, 3- $h=6\text{ мм}$

Figure 6. Dependence of edge stress distribution on the thickness of glass layer 2:
 $E_{ai} = 1 \text{ GPa}$, $\delta = 0.37 \text{ mm}$, $l = 500 \text{ mm}$, $H = 6 \text{ mm}$, $1-h = 1 \text{ mm}$, $2-h = 3 \text{ mm}$, $3-h = 6 \text{ mm}$

Таким чином, спосіб зменшення концентрації напружень зсуву в крайовій зоні композиту – зменшення жорсткості адгезійного шару (рис. 7). Одночасне зниження модуля Юнга E_{ai} від 1 ГПа в 0,1 ГПа і збільшення товщини δ адгезійного прошарку від 0.37 мм до 4 мм призводить до зниження τ/σ_t до 0,02.

З метою зниження концентрації напружень на краю адгезійного з'єднання з одночасним збереженням загальної високої жорсткості композиту запропоновано методом зменшення модуля пружності в зоні крайового ефекту. Як приклад, розглянуто закон зміни модуля пружності вздовж довжини композиту як дзеркальне відображення закону зміни напружень зсуву, коли E_{ai} змінюється від 1 ГПа до 0,01 ГПа.

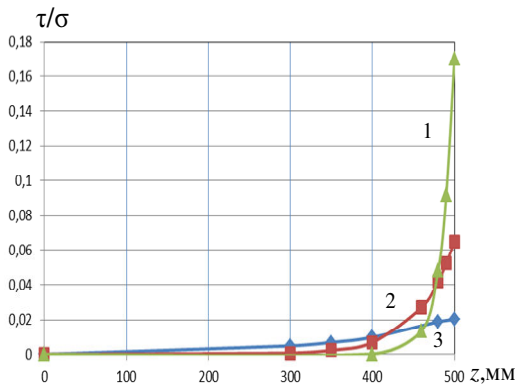


Рисунок 7. Керування крайовими напруженнями зсуву за рахунок зміни жорсткості адгезійного прошарку:
 1 – $E_{ai} = 1 \text{ ГПа}$, $\delta = 0.37 \text{ мм}$,
 2 – $E_{ai} = 1 \text{ ГПа}$; $\delta = 4 \text{ мм}$ або $E_{ai} = 0, 1 \text{ ГПа}$,
 $\delta = 0.37 \text{ мм}$ ($E_{ai}/\delta \sim \text{const}$), 3 – $E_{ai} = 0, 1 \text{ ГПа}$, $\delta = 4 \text{ мм}$

Figure 7. Shear stress control by the change of adhesive layer rigidity:
 1 – $E_{ai} = 1 \text{ GPa}$, $\delta = 0.37 \text{ mm}$,
 2 – $E_{ai} = 1 \text{ GPa}$, $\delta = 4 \text{ mm}$ or $E_{ai} = 0, 1 \text{ GPa}$,
 $\delta = 0.37 \text{ mm}$ ($E_{ai}/\delta \sim \text{const}$), 3 – $E_{ai} = 0, 1 \text{ GPa}$,
 $\delta = 4 \text{ mm}$

Заміна постійного значення E_{ai} функціональною залежністю $E_{ai}=f(z)$ призводить до того, що коефіцієнт k (3) стає змінним. Тому рівняння (2) перетворюється в диференціальне рівняння другого порядку зі змінним коефіцієнтом

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - k^2(z)w(z) = 0. \quad (5)$$

Чисельне розв'язання цього рівняння методом Рунге-Кутта в середовищі С дозволяє отримати $w(z)$ і розподіл напружень зсуву у випадку змінного модуля пружності прошарку. На рис. 8 продемонстровано, що при збереженні загальної жорсткості композиції максимальне напруження зсуву в крайовій зоні композиту за рахунок застосування адгезійного прошарку зі змінним модулем пружності вдалося зменшити в 1,4 раза у порівнянні з максимальною величиною цього ж напруження для композиції з постійним модулем пружності прошарку 1 ГПа.

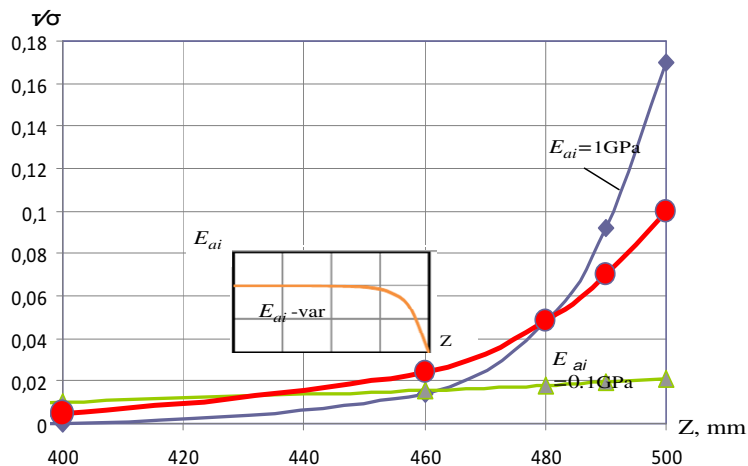


Рисунок 8. Керування концентрацією напружень зміною модуля пружності адгезиву

Figure 8. Shear stress control by replacement of adhesion modulus of elasticity

Можуть бути запропоновані також деякі інші способи зменшення крайового ефекту за рахунок зміни модуля пружності прошарку, зокрема, можна припустити, що зміна модуля пружності може відбуватися ступінчасто: від низьких значень на краю до високих в середній частині композиції.

Висновки. Показано, що сучасне авіаційне скління є складною системою та проаналізовано фактори, що визначають ресурс та несівну здатність цієї системи. Визначено набір геометричних та фізико-механічних параметрів, що характеризують елементи системи та зв'язок між цими елементами і визначають жорсткість та адгезійну міцність з'єднання силовий блок – електрообігрівне скло. Складено та аналітично розв'язано лінійне диференціальне рівняння рівноваги другого порядку з постійними коефіцієнтами, яке дозволяє отримати напруження в адгезійному контакті як функцію геометричних та фізико-механічних параметрів системи. Виконано аналіз та визначено, що мінімальна концентрація крайових напружень характерна для з'єднань з більш низькими значеннями модуля Юнга і більшою товщиною адгезійного прошарку. Натомість, такі композиції мають низькі значення міцності й жорсткості та недостатню несівну здатність при механічному і тепловому навантаженні. Показано, що композиція з високою міцністю може бути реалізована з використанням жорстких матеріалів для адгезійного прошарку. Однак, надмірна концентрація і високий рівень крайових максимальних напружень у цьому випадку призведе до руйнування цих композицій. З цієї ж причини збільшення довжини адгезійного контакту не є ефективним способом для збільшення несівної здатності.

Чисельне розв'язання лінійного диференціального рівняння другого порядку зі змінними коефіцієнтами, отриманого для запропонованого «дзеркального» закону зміни по довжині композиції модуля пружності адгезійного прошарку показало, що локальне зниження модуля пружності в крайовій зоні композиції зі скломатеріалів з адгезійним прошарком дозволяє зберегти високу жорсткість композиції та одночасно зменшити концентрацію напружень зсуву, що забезпечує міцність зчеплення елементів композиту. Результатом застосування такого підходу є підвищення опору руйнуванню та несівної здатності композиції. Визначено тенденції та виділено напрямки, що гарантують належну несівну здатність та ресурс системи «авіаційне скління» на основі цілеспрямованого вибору параметрів адгезійного з'єднання з урахуванням концентрації напружень у крайовій зоні. Отримані результати закладають основу для конструювання складної системи із листового скла, з'єданого адгезивом, з оптимізованої за параметрами міцності й жорсткості.

Conclusions. It is shown that the modern electric heated cockpit glazing is a complex system. The factors that determine the load carrying capacity and resource of this system are analyzed.

Geometrical, physical and mechanical parameters of the system that characterize elements of the system and relationship between these elements and determine the adhesive strength and stiffness of the joint are identified.

The solution of a linear differential equation of second order with constant coefficients allows obtaining shear stresses in adhesive contact as a function of geometrical, physical and mechanical parameters of the system.

Analysis shows that minimal concentration of the edge stress is the characteristic for joints with the lower values of Young's modulus and increased thickness of adhesive layer. But low strength and rigidity of these joints leads to insufficient load-bearing behavior under mechanical and thermal loading. Compositions with high strength can be realised using the strong and rigid adhesive materials. However, the excess concentration and high level of

maximal edge stress will lead to fracture of these compositions. Increasing of the length of rigid joints is not the effective way for carrying capacity increasing for this reason.

Replacement of constant E_{ai} by functional dependence $E_{ai} = f(z)$ leads to differential equation of second order with variable coefficients. Its solution shows that the decrease in the elastic modulus of the adhesive interlayer in the edge region allows retaining enough rigidity to ensure carrying capacity of joint and decreasing in shear stress concentration to provide adhesive strength of composite.

The following tendencies may be useful to guarantee appropriate carrying capacity of this structures taking into account shear stress concentration near the joint edge. The obtained results can be a basis for purposeful choice of cockpit glazing parameters to improve its carrying capacity and resource.

Список використаної літератури

1. Згуровский, М.З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения [Текст] / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. – Киев: Наукова думка, 2005. – 743 с.
2. Kiselev, A.G. Stress state at the edge points of diffusion joints of dissimilar materials / A.G. Kiselev // in: Collection of Science Papers. – М.: Izd. MIFI, 2000. – P. 131 – 132.
3. Bedly, M.R. Delamination of thin films from two-dimensional interface flaws at corners and edges / M.R. Bedly, J.M. Ambrico // International Journal of Fracture. – 2001. – № 3 – P. 205 – 222.
4. Maslov, V.M. Reduction of edge effect in the adhesive joint of pyroceramics / V.M. Maslov, O.B. Soroka, B.A. Lyashenko, Yu.M. Rodichev // Strength of materials. – 2005. – № 6 – P. 606 – 612.
5. Soroka, O. Reduction of Edge Effect in Adhesive Joints of Glass Details/ O. Soroka, Yu. Rodichev, O. Shabetia // Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology (Delft, Netherland, June 2012). – IOS Press, 2012. – P. 349 – 358.

Отримано 05.08.2013