

УДК 629.13

О. Мильніков, канд. фіз.-мат. наук
М. Підгурський, докт. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРИПЛЕКСІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ЗНИЖЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Резюме. Досліджено напружено-деформований стан (НДС), який виникає в тришарових клеєних скляних конструкціях – гомогенних та гетерогенних триплексах з обрамленням та без нього, в результаті температурних впливів на конструкцію.

Ключові слова: напружено-деформований стан, скло, температура, триплекс, фотопружність.

О. Mylnikov, M. Pidhurskyu

RESEARCH OF THE STRESSED-STRAINED STATE OF TRIPLEXES IN EXPLOITATION AT LOW TEMPERATURES

The summary. Triplex glass is widely used for glassing vehicles (automobiles, railway vehicles, aircrafts and ships), windows and facades of buildings. Such constructions often work under sudden drops in temperature [extreme temperatures]. Therefore, the research of the stressed-strained state of triplexes in exploitation at low temperatures is of a great topicality

The aim of the work is to research the stressed-strained state (SSS) appearing in the three-layered glued glass constructions: homogeneous and non-homogeneous triplexes with and without framing line, as a result of temperature influences.

The problem has been solved with the polarized-optical method (POMM) – method of photoelasticity.

The idea of modeling had been considered and implemented before analyzing SSS in full scale samples, in order to create and practice the methods of temperature load and research, as well as destruction of samples. Herewith, the same materials were chosen for triplexes models and full scale samples.

Experimental conditions lied in determining the stressed-strained state (SSS) in the explored triplexes during the decrease of temperature from room $T=293K$ to the fixed values of $T = 273, 253, 233, 213 K$ and identifying the moment of their destruction.

The method of integrating differential equations of equilibrium in finite differences has been used for the stress separation.

According to the research objectives the maximum tangential (critical) stresses τ_{max} and normal stresses σ_x and σ_y , formed in the zones of glued surfaces contact have been defined.

The distribution of normal stresses σ_x directed at each point along the gluing in triplexes, stress σ_y , directed perpendicular to the gluing layer and tangential stresses τ_{max} are presented graphically.

The analysis of the received results has been conducted. The testing data indicates that the fracture of heterogeneous triplexes without framing line occurs at temperatures $\sim 268 K$, and with the frame line - at temperatures $\sim 245 K$. Moreover, the process of destruction takes place in the layer of silica glass in parallel with the gluing. In other samples the destruction in the researched range of temperatures was not observed. The reason for the destruction of heterogeneous structures is, evidently, the character of SSS, changing from compressive stresses at the edges of samples to stretching stresses in the middle of the sample. This situation leads to the detachment of silica glass and its destruction.

The testing data can be used in glassing vehicles (automobiles, railway vehicles, aircrafts and ships), windows and facades of buildings.

Key words: *stressed-strained state, glass, temperature, triplex, photoelasticity.*

Постановка проблеми. Для застосування транспортних засобів (автомобілів, залізничного рухомого складу, літаків, суден), вітрин і фасадів будівель широко застосовують триплексне скло, що являє собою два і більше шарів органічного чи силікатного скла [1], склеєних між собою полімерною плівкою або затвердіваючою композицією, здатною при ударі втримувати осколки. Триплекси з органічного скла легші за силікатні, пластичніші, краще гнуться, але їх міцність суттєво менша, ніж силікатних. Також нижчими є оптичні характеристики, особливо при запотіванні чи замерзанні. Для органічних, а особливо для силікатних триплексів важливою є якість склейки, яка визначається якістю клею (плівки) й адгезійними властивостями поверхонь склеювання, особливо з урахуванням температур експлуатації. Тому актуальним є дослідження напружено-деформівного стану триплексів при знижених температурах експлуатації.

Аналіз публікацій. Проблемам моделювання напружено-деформівного стану (НДС) автомобільного скла при складанні присвячені роботи [2, 3]. Для моделювання застосовувались спеціалізовані програмні пакети. Дослідження проводились за нормальних температур. Відзначено, що важливою причиною раптових руйнувань об'єктів є внутрішні залишкові напруження, що виникають у деталі, з'єднанні або конструкції. У [4] відзначено, що причиною руйнувань можуть також бути як поверхневі, так і особливо внутрішні дефекти, що виникають у процесі скловаріння та склеювання. Оцінювання надійності органічного й силікатного скла в літакобудуванні розглядалась в роботі [5]. Проте результати даних робіт базуються на даних моделювання НДС за допомогою програмних пакетів, що може призвести до суттєвих похибок [6]. Крім цього, НДС та процеси руйнування не досліджувалися за нестационарних температур випробувань.

Мета роботи. Дослідження напружено-деформованого стану (НДС), який виникає в тришарових клеєних конструкціях – гомогенних та гетерогенних триплексах з обрамленням та без нього, в результаті температурних впливів на конструкцію.

Задачу розв'язували поляризаційно-оптичним методом дослідження напружень (ПОМДН) – методом фотопружності.

Натурні дослідження проводили на зразках, представлених на рис. 1:

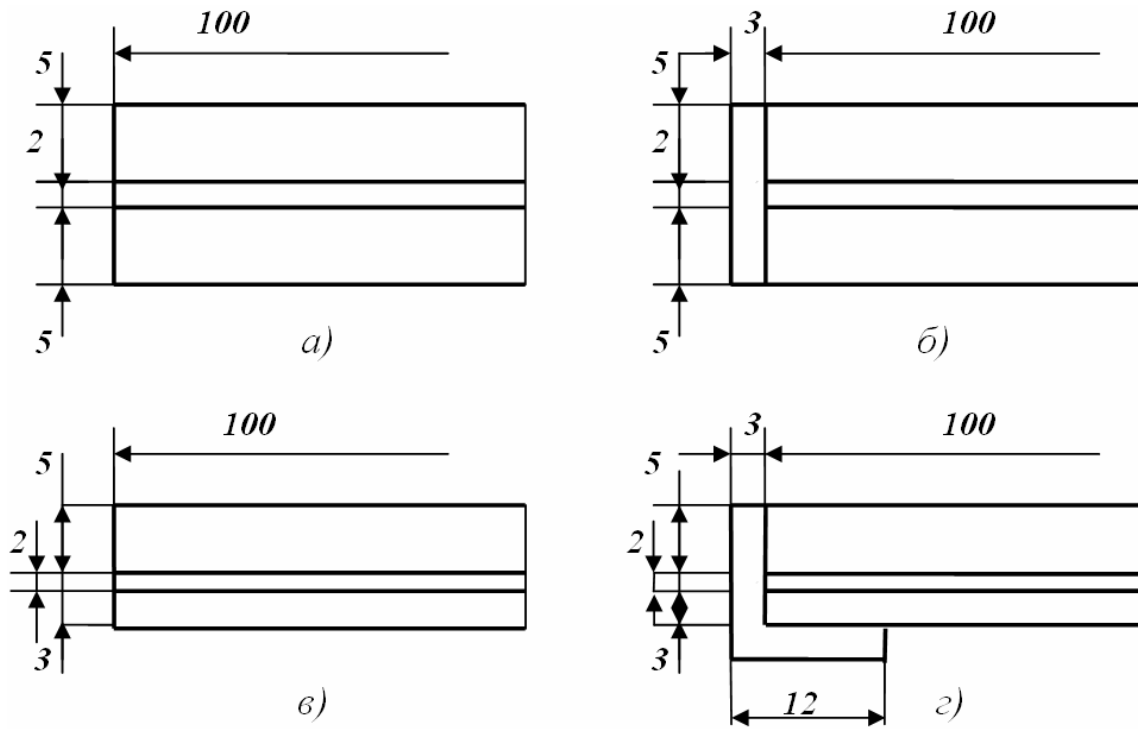


Рисунок 1. Гомогенні (а,б) та гетерогенні (в,г) триплекси:

- а) гомогенний триплекс без обрамлення;
- б) гомогенний триплекс з обрамленням;
- в) гетерогенний триплекс без обрамлення;
- г) гетерогенний триплекс з обрамленням

Figure 1. Homogeneous (a, b) and heterogeneous (c, d) triplexes

- a) homogeneous triplex without framing line;
- b) homogeneous triplex with framing line;
- c) heterogeneous triplex without framing line;
- d) heterogeneous triplex with framing line

1. Гомогенний триплекс розмірами 100x12x10 мм, у якого зовнішнім і внутрішнім шарами є силікатне скло (товщиною 5 мм) з товщиною клейового прошарку 2 мм – рис. 1а.

2. Гомогенний триплекс аналогічної будови та з тими ж розмірами, але з обрамленням по краях, товщиною 3 мм – рис. 1б.

3. Гетерогенний триплекс розмірами 100x10x10 мм, у якого зовнішнім шаром є силікатне скло товщиною 5 мм, клейовий прошарок – 2 мм та органічне скло – ОАСО – Е2 - 3 мм – рис. 1в.

4. Гетерогенний триплекс аналогічної будови та з тими ж розмірами з Г-подібним обрамленням, товщиною 3 мм – рис. 1г.

Для прошарку в усіх триплексах використовували листовий матеріал ЕПСА другої стадії полімеризації, а з'єднання (склейка) елементів зразків між собою виконувалось із застосуванням епоксидної смоли ЕД-20, стужавілої поліетиленполіаміном ПЕПА з пластифікатором дибутилфталатом у співвідношеннях 10:1:1. Обрамлення в усіх зразках виконувалося з ЕПСА другої стадії полімеризації.

Перед вивченням НДС у натурних зразках, з метою створення та відпрацювання методики температурних навантажень і досліджень, а також руйнування зразків була розглянута й реалізована ідея моделювання. При цьому для моделей триплексів вибирали ті ж самі матеріали, що й для натурних зразків.

Одним із найважливіших етапів у розумінні процесів, що відбуваються в триплексах при температурних впливах, є моделювання склейки матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення (КЛТР).

Основні оптико-механічні властивості матеріалів, що використовувалися при моделюванні триплексів, наведено в табл. 1.

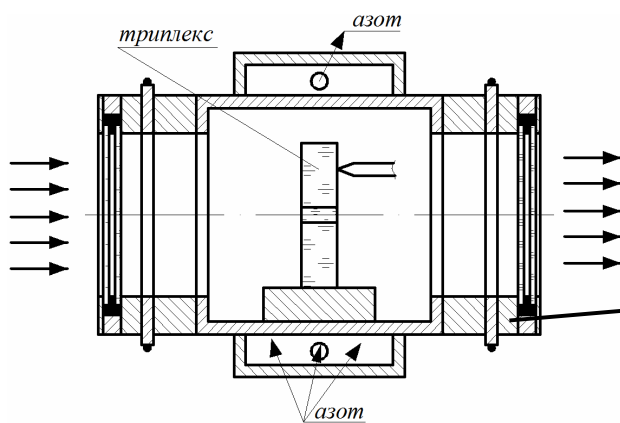
Таблиця 1.

Оптико-механічні характеристики матеріалів триплексів

Матеріал	Коефіцієнт оптичної чутливості $C \cdot 10^7, \text{МПа}^{-1}$	Температура заморожування $T_3, \text{К}$	Модуль пружності $E \cdot 10^{-3}, \text{МПа}$	КЛТР $\alpha_T \cdot 10^5, \text{град}^{-1}$
Оргскло ОАСО – Е2	50	443	3,5	3,6
ЕПСА першої стадії полімеризації	60	198	1,8	7,3
ЕПСА другої стадії полімеризації	55	218	2,1	6,7
Силікатне скло	2,5	-	7,5	2,3

У результаті склеювання оптична анізотропія в оргсклі практично не спостерігалася і при подальших дослідженнях не враховувалась.

Методика досліджень. Умови проведення експерименту полягали у визначенні напружено-деформованого стану (НДС) у досліджуваних триплексах при зниженні температури від кімнатної $T=293\text{K}$ до фіксованих значень $T = 273, 253, 233, 213 \text{ K}$ та визначенні моменту їх руйнування. При цьому зразки, що досліджувалися, поміщали в камери для охолодження, встановлені у робочому полі координатно-синхронного поляриметра КСП-7 (рис. 2).



Низькотемпературна випробувальна камера
(холодоагент – рідкий азот)

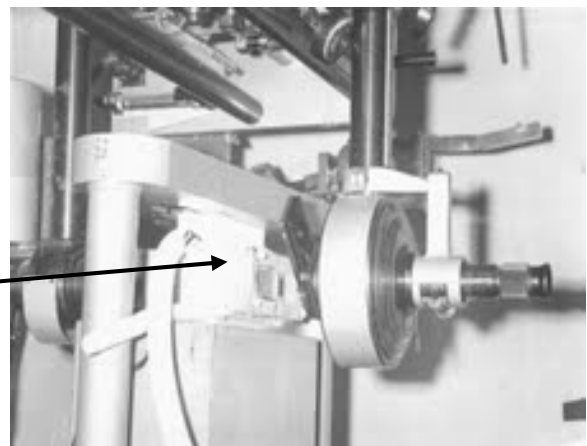


Рисунок 2. Випробування триплексів у діапазоні температур 293–213К

Figure 2. Triplexes testing in the temperature range 293–213 K

Методика досліджень, низькотемпературні камери та спеціальні пристрої детально описано у [7]. Необхідно відзначити, що згідно з методикою випробувань до низькотемпературних камер ставились такі вимоги:

- забезпечення оптичних досліджень у прохідному світлі;
- ізоляція зразків від зовнішнього середовища для попередження конденсації на них атмосферної вологи при зниженні температури;
- термостабілізація зразків у широкому діапазоні регульованих температур 213–293 К.

Для оцінювання НДС методом фотопружності проводили виміри оптичної різниці ходу δ у зразках. При розробленні методики враховувалась низька оптична чутливість силікатного скла. Достатню точність при визначенні параметрів напруження для таких досліджень дає дещо вдосконалений нами метод Сенармона [8, 9]. Використання різних довжин робочих хвиль монохроматичного світла дало можливість надійно визначити не тільки дробовий, але й цілий порядок смуг (ізохром).

Реалізація цього методу здійснювалась на координатно-синхронному поляриметрі КСП-7 у монохроматичному світлі з основною довжиною хвилі $\lambda_1 = 546,1$ нм та допоміжною – $\lambda_2 = 578$ нм.

Методика визначення напружень. Зразки, встановлені у спеціальні камери для їх охолодження та термостабілізації, просвічувалися монохроматичним світлом з різною довжиною хвиль зонduючого випромінювання, що давало можливість визначити фотопружні параметри, зокрема порядок смуги – n (цілий і дробовий) та ізоклін. Далі за відомою довжиною зонduючого променя світла – λ визначали оптичну різницю ходу – δ в точці

$$\delta = n \cdot \lambda .$$

Зв'язок НДС та картини оптичної анізотропії визначається в пружній зоні законом Вертгейма:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{C \cdot d},$$

де δ – оптична різниця ходу променів в точці;

C – коефіцієнт оптичної чутливості матеріалу;

d – товщина зразка, що просвічується;

σ_1, σ_2 – квазіголовні напруження в точці, що просвічується.

Різниця квазіголовних напружень у точці дає можливість обчислити максимальні дотичні напруження у фронтальній площині просвічування

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{max},$$

а також шляхом поділу напружень (при відомому параметрі ізокліни φ у точці), знайти компоненти напружень σ_x та σ_y .

Для поділу напружень використовували метод інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги у скінченних різницях [7]. Як відомо, для плоского напруженого стану

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Після інтегрування, починаючи з контуру моделі, отримано:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\int_{x_0}^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \\ \sigma_y = -\int_{y_0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \end{cases}$$

Тоді в скінченних різницях

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{x0} - \sum_{x0}^x \Delta \tau_{xy} \frac{\Delta x}{\Delta y} \\ \sigma_y = \sigma_{y0} - \sum_{y0}^y \Delta \tau_{xy} \frac{\Delta y}{\Delta x} \end{cases}$$

Оскільки на вільному контурі $\sigma_{x0} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi$ (у нашому випадку $\varphi = 0$), отримаємо $\sigma_{x0} = \sigma_1$. Тоді $\sigma_{y0} = \sigma_2$, і відповідно

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\varphi.$$

Систему координат XVZ вибирали таким чином, щоб вісь X була спрямована вздовж склейки, вісь V – перпендикулярно до склейки, а вісь Z – у напрямку товщини зразків (рис. 3).

Заміри оптичної різниці ходу проводились у точках, що розташовані по лінії на відстані 1 мм від краю триплекса (у випадку обрамлення – на відстані 1 мм від обрамлення).

Оскільки температурні напруження в триплексах викликають оптичну анізотропію в силікатному склі, що не перевищує одну смугу – ізохрому (тобто $n \leq 1$), вимірювання оптичної різниці ходу δ в шарі силікатного скла обмежувалися тільки визначенням дробової частини смуги, в той час як вимірювання δ у шарі органічного скла проводили з визначенням як дробової, так і цілої частин смуги, яка максимально досягала значення 2.

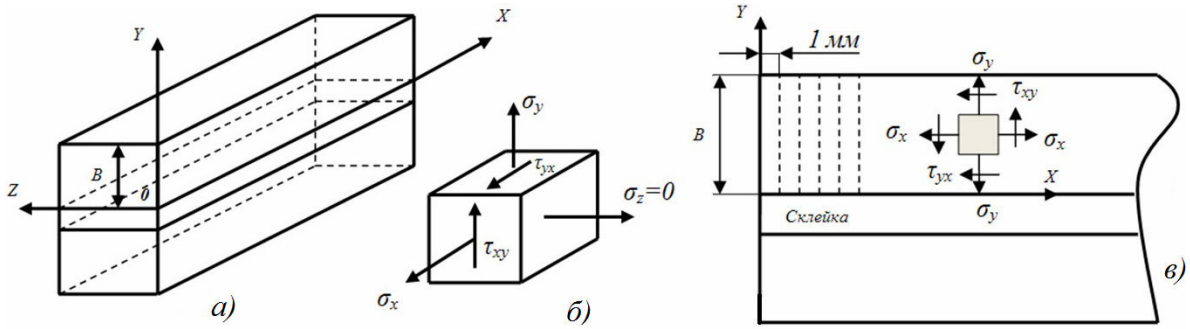


Рисунок 3. Модель триплекса:

- a) – вибір системи координат;
- б) – орієнтація напружень;
- в) – схема розбивки зони визначення напружень

Figure 3. Triplex model:

- a) – choice of coordinate system;
- b) – stress orientation;
- c) – scheme of splitting a stress defining zone

Аналіз результатів досліджень НДС багат шарових конструкцій. Згідно з задачами досліджень визначалися такі компоненти напруженого стану:

- максимальні дотичні (сколюючі) напруження τ_{max} ;
- нормальні напруження σ_x та σ_y .

Залежність максимальних дотичних напружень τ_{max} відображена на графіках рис. 4.

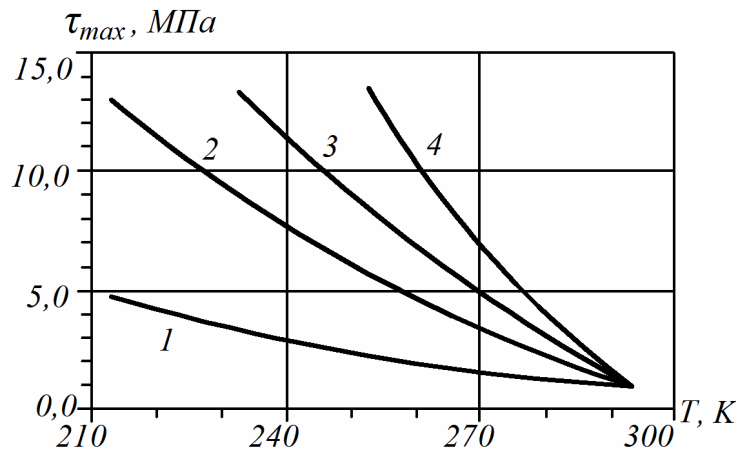


Рисунок 4. Залежність максимальних дотичних напружень у точках $x=1$ мм, $y=1$ мм триплексів від температури:

- 1- гомогенний триплекс без обрамлення;
- 2- гомогенний триплекс з обрамленням;
- 3- гетерогенний триплекс без обрамлення;
- 4- гетерогенний триплекс з обрамленням

Figure 4. Dependence of maximum tangential stresses in the triplexes' boundary zones ($x=1$ mm, $y=1$ mm) from temperature:

- 1 - homogeneous triplex without framing line;
- 2 - homogeneous triplex with framing line;
- 3 - heterogeneous triplex without framing line;
- 4 - heterogeneous triplex with framing line

Розподіл нормальних напружень σ_x , направлених у кожній точці вздовж склейки в триплексах, та напружень σ_y , направлених перпендикулярно до шару склейки, зображені на рис. 5, 6.

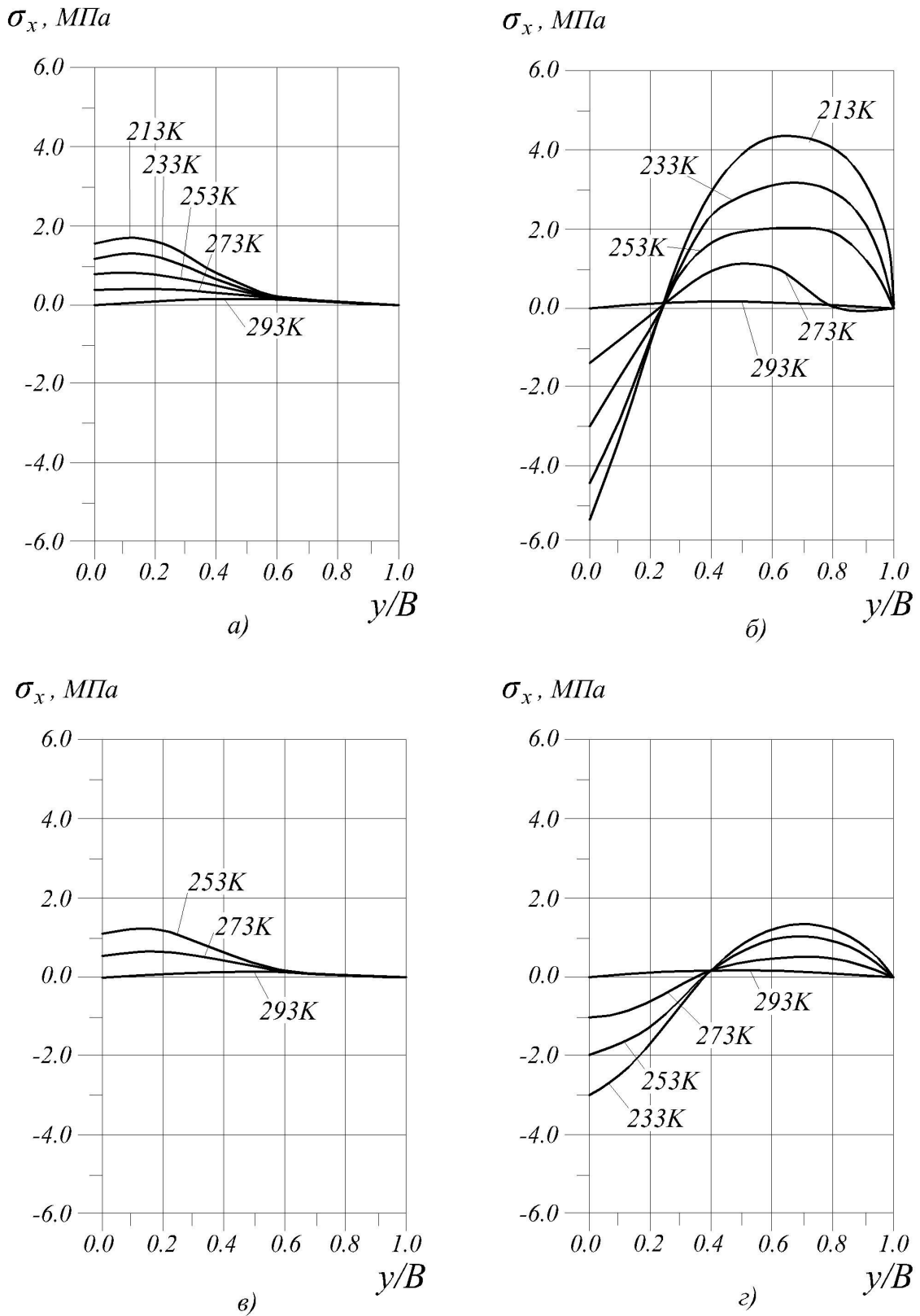


Рисунок 5. Розподіл напружень σ_x на відстані 1 мм від обрамлення чи краю вірця:
 а) гомогенний триплекс без обрамлення;

- б) гомогенний триплекс з обрамленням;
- в) гетерогенний триплекс без обрамлення;
- г) гетерогенний триплекс з обрамленням

Figure 5. The distribution of stresses σ_x at 1 mm distance from the framing line or the edge of the model:

- a) homogeneous triplex without framing line;
- b) homogeneous triplex with framing line;
- c) heterogeneous triplex without framing line;
- d) heterogeneous triplex with framing line

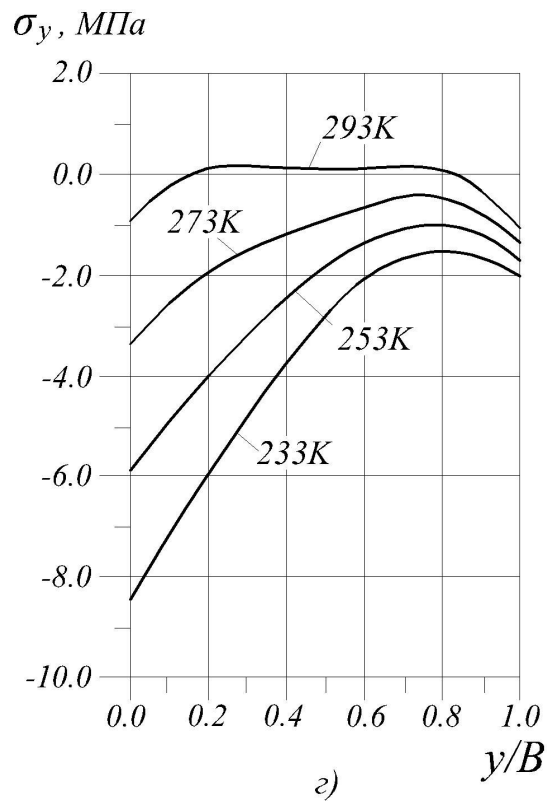
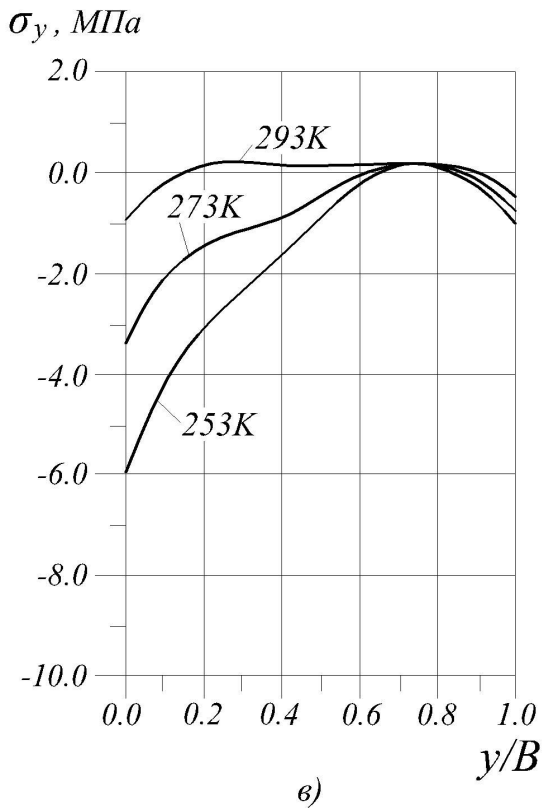
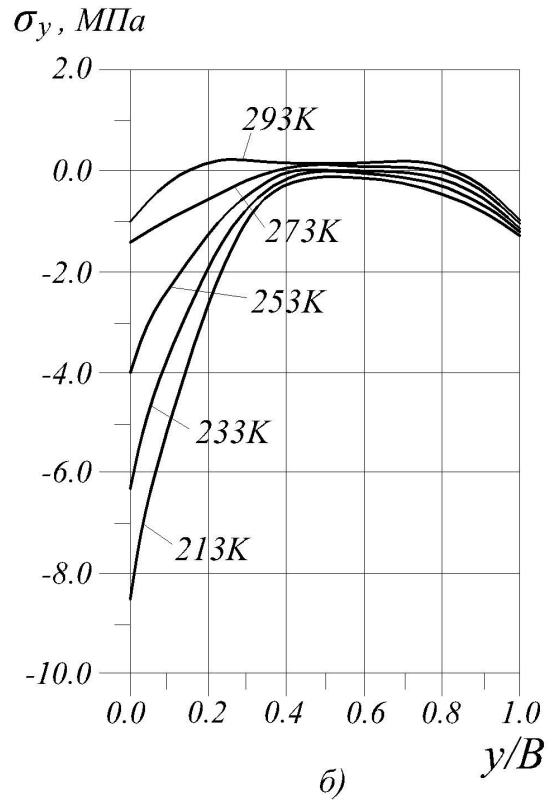
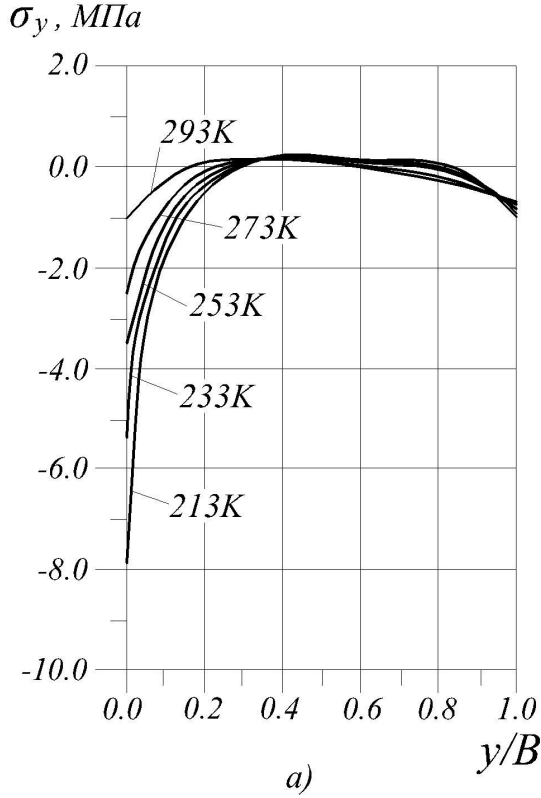


Рисунок 6. Розподіл напружень σ_y по лінії, що перпендикулярна лінії склеювання в триплексах:

- a) гомогенний триплекс без обрамлення;
- б) гомогенний триплекс з обрамленням;
- в) гетерогенний триплекс без обрамлення;
- г) гетерогенний триплекс з обрамленням

Figure 6. The distribution of stresses σ_y on the line perpendicular to the gluing line in triplexes:

- a) homogeneous triplex without framing line;
- b) homogeneous triplex with framing line;
- c) heterogeneous triplex without framing line;
- d) heterogeneous triplex with framing line

Висновки. Аналізуючи результати досліджень, відзначимо наступне:

1. Нормальні напруження σ_x суттєво менші за абсолютною величиною, ніж σ_y . На краях зразків без обрамлення напруження σ_x є додатними, а на зразках з обрамленням – від’ємними.

2. За наявності обрамлення дещо підвищуються від’ємні напруження σ_y . Отже обрамлення суттєво знижує рівні розтягуючих напружень у крайових зонах триплексів. У подальшому на міцність зразків з обрамленням вже впливатимуть властивості самого обрамлення, особливо його адгезійні властивості щодо силікатного скла.

3. Зниження температури викликає суттєве збільшення напружень за абсолютною величиною. Дослідження НДС у натурних зразках дозволило отримати якісні співпаданя картин розподілу напружень з тими, що виникали при модельних дослідженнях.

4. При дослідженні картини оптичної анізотропії бачимо, що в крайових зонах триплексів за низьких температур спостерігається максимальне значення сколюючих дотичних напружень (рис. 4). При цьому в триплексах з обрамленням величини цих напружень перевищують величину відповідних напружень у триплексах без обрамлення. У той же час наявність обрамлення за даними експериментів є фактором, що підвищує міцність триплексів.

5. Дані випробувань свідчать про те, що руйнування гетерогенних триплексів без обрамлення відбувається при температурах ~ 268 К, а з обрамленням – при температурах ~ 245 К. Причому процес руйнування проходить у шарі силікатного скла, паралельно склейці. В інших таких зразках руйнування в діапазоні досліджуваних температур не спостерігалось. Причиною руйнування гетерогенних структур є, очевидно, характер НДС, який змінюється від стискаючих напружень на краях зразків до розтягуючих напружень посередині зразка. Такий стан зумовлює відшарування силікатного скла та його руйнування.

6. Отримані результати можуть застосовуватися при конструюванні транспортних засобів автомобільного транспорту, в авіабудуванні, суднобудуванні, будівництві.

Conclusions. Having analyzed the results of the research, we would like to note the following:

1. Normal stresses σ_x are significantly smaller in absolute value than σ_y . At the edges of the samples without framing line σ_x stress is positive, and at the samples with framing line - negative.

2. If there is a framing line the negative stresses σ_y slightly increase. Thus, the framing line significantly reduces the levels of stretching stresses in the boundary zones of triplexes. Further, the strength [solidity] of samples with framing line is influenced by the properties of the framing line, particularly by its adhesive features concerning silica glass.

3. A decrease in temperature causes a substantial increase in stresses in absolute value. The research of SSS in full scale samples allowed obtaining high-quality match depiction of stress distribution comparing with those appearing in model studies.

4. During the research of optical anisotropy it was evident that maximum value of critical tangential stresses is observed in the boundary zones of triplexes at low temperatures (fig. 4). Herewith, the values of these stresses in the triplex with framing line exceed the values of the corresponding stresses in the triplexes without framing line. At the same time in accordance with the experimental data the framing line is a factor that increases the triplexes' strength [solidity].

5. The testing data indicates that the fracture of heterogeneous triplexes without framing line occurs at temperatures ~ 268 K, and with the frame line - at temperatures ~ 245 K. Moreover, the process of destruction takes place in the layer of silica glass in parallel with the gluing. In other samples the destruction in the researched range of temperatures was not observed. The reason for the destruction of heterogeneous structures is, evidently, the character of SSS, changing from compressive stresses at the edges of samples to stretching stresses in the middle of the sample. This situation leads to the detachment of silica glass and its destruction.

6. The testing data can be used in glassing vehicles (automobiles, railway vehicles, aircrafts and ships), windows and facades of buildings.

Список використаної літератури

1. Солнцев, С.С. Разрушение стекла [Текст] / С.С. Солнцев, Е.М. Морозов. – 2008. – 156 с.
2. Мурзаева, И.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния автомобильного стекла при сборке [Текст] / И.В. Мурзаева, Н.В. Носов. // Вестник Самарского ГТУ. Сер. „Технические науки”. – 2007. – № 2 (21). – С. 130–135.
3. Хорычев, А.А. Исследование и анализ напряженно-деформированного состояния системы «кузов-стекло» ветрового окна автомобиля [Текст] / А.А. Хорычев, В.Н. Кравец // Изв. вузов. Машиностроение. – 2007. – № 2. – С. 57–60.
4. Солинов, В.Ф. Некоторые особенности современных защитных стекол [Текст] / В.Ф. Солинов // Каталог "Бронеавтомобили. Специальное приложение к журналу "Системы безопасности". – 2005. – С. 8–12.
5. Солинов, В.Ф. Роль авиационного остекления в обеспечении безопасности полетов [Текст] / В.Ф. Солинов // Труды междунар. конференции «Авиация и космонавтика». – Москва: МАИ, 2011. – С. 121–124.
6. Токарева, М.А. К вопросу оценки напряженно-деформированного состояния рамных металлоконструкций мобильных машин [Текст] / М.А. Токарева, В.И. Рассоха, В.Ю. Филиппов // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 11. – С. 9–11.
7. Пидгурский, Н.И. Методика испытаний образцов в неоднородных температурных полях [Текст] / Н.И. Пидгурский // Заводская лаборатория. – 1994. – Т. 60. – № 8. – С. 57–59.
8. Сухарев, И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности [Текст] / И.П. Сухарев. – М.: Машиностроение, 1987. – 216с.
9. Мильников, О.В. Оцінка НДС та опору руйнуванню гомогенних і гетерогенних структур [Текст] / О.В. Мильников, М.І. Підгурський // 36. тез доповідей VIII Міжнар. наук. конф. «Математичні

10. проблеми механіки неоднорідних структур» 14–17 вересня 2010 р. – Львів: ІПІМ ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2010. – С. 332–333.

Отримано 10.04.2012