

УДК 519.6:531.4

Ю. Рудяк, канд. фіз.-мат. наук; М. Підгурський, докт. техн. наук

Тернопільський державний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО ТА ГРАНИЧНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР З КОНЦЕНТРАТОРАМИ

Резюме. Представлено результати розроблення нових оптичних експериментально-розрахункових методів визначення напружено-деформованого стану (НДС) об'єктів – методу поглинання (МП) та методу дифузного поверхневого розсіювання (МДПР). Дія МП базується на n' -ізооптичному ефекті поглинаючого середовища, а МДПР – на перерозподілі інтенсивностей дзеркальної та дифузних складових дифузно відбитого поверхнею потоку при локальній зміні її кривизни. Модифіковано поляризаційно-оптичний метод дослідження НДС для малих за величиною картин оптичної анізотропії. Запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків – критерій тензора діелектричної проникності (ТДП). На основі модифікованого поляризаційно-оптичного методу та критерію ТДП проведено комплексне дослідження НДС та граничного стану багат шарових структур (триплексів) з концентраторами.

Ключові слова: оптичні методи, напружено-деформований стан, граничний стан, тріщина, триплекси.

Умовні позначення:

НДС – напружено-деформований стан;

МП – метод поглинання;

МДПР – метод дифузного поверхневого розсіювання;

ТДП – тензор діелектричної проникності;

КІН – коефіцієнт інтенсивності напружень;

МСЕ – метод скінченних елементів.

Yu. Rudiak, M. Pidhurskyi

OPTICAL METHODS OF STRESS-STRAIN AND BOUNDARY STATES OF MULTILAYER STRUCTURES WITH CONCENTRATORS

Summary. In the article the authors presented the data on the development of new optical experimental and computational methods for determining the SSS objects – the absorption method (AM) and the method of diffuse surface scattering (MDSS). The effects of AM are based on piezooptic effect of absorbing environment. The theoretical justification of the method is derived from the joint solution of the Maxwell-Neumann's equations linking the shift components of the dielectric penetration tensor (DPT) with the Bouguer-Lambert-Beer equation, describing the passage of light through the absorbing environment. Experimental realization of the AM deals with the measuring of the absorption intensity of light polarized in the principal areas. The method makes possible to find separately the main stresses and strains immediately rather than their linear combination, as it occurs in the interference methods. The MDSS effect is based on measurements of intensity redistribution of mirror and diffuse components of the luminous flux, reflected by its diffuse scattering surface under local change of its curvature. The authors obtained the formulae for the coefficient values of intensity moments in the crack tip threshold for the sharp stress state, as well as evaluated the dynamics of the «neck-like formation area extension». The authors proposed options of surface deformation meters, operating on the MDSS effect in two real solutions. In one of them an active element of the meter is a curved plate, and in the other – the gouge with diffuse reflecting surface. To estimate the boundary condition of the machine parts and structures made of dielectrics the authors proposed the physical-mechanical DPT. According to this criterion the alteration of the physical factors complex (temperature, humidity, radiation) not only the limit of strength is changed, but also the expression for the equivalent stress due to the alteration of the value of the optical and mechanical constants

ratio. The authors modified the polarization and optical method to determine the small size pictures of optical anisotropy. These measurements were conducted in two points in the area of elastic asymptotic in the crack tip threshold. The authors obtained the formulae for finding SIF in the case of heterogeneous stress state. The modified polarization and optical method as well as physical and mechanical criterium of DPT boundary condition were applied for the complex study of multilayer structures (triplexes) with the possible availability of crack-like effects in their component parts (elements); the kinetics of inorganic silicate glass fracture being researched. The authors analyzed the data on the fracture of the organic glass plates with threshold cracks. The authors simulated the impact of the frame on SIF during penetration of surface cracks into transverse ones in glueing layer. Basing on the conducted research the impact of framing and heterogeneity on the strength of triplexes has been estimated and the effective constructive option has been chosen.

Key words: optical methods, stress-strain condition, boundary condition, crack, triplex.

Постановка проблеми. Розвиток сучасного машинобудування неможливий без визначення характеристик міцності елементів машин і конструкцій, оцінювання їх граничного стану. Особливо це актуально на стадії проектування машин, зниження їх матеріаломісткості. Тому ефективно оцінювання НДС і граничного стану елементів машин і конструкцій, різноманітних вузлів агрегатів залишається актуальним і важливим для практики завданням, вирішення яких потребує застосування ефективних методів досліджень. Бурхливий розвиток, особливо в останні роки, комп'ютерної техніки і технологій значно підвищив ефективність застосування аналітично-чисельних методів. Сучасний математичний апарат і можливості комп'ютерного моделювання дозволяють знаходити вирішення багатьох завдань сучасної механіки. Особливе місце серед чисельних методів, завдяки своїй дуже високій ефективності, займає метод скінчених елементів (МСЕ). Але при беззаперечних успіхах аналітичних та чисельно-аналітичних методів існує значна необхідність у застосуванні експериментальних методів. Це пов'язано з тим, що неможливо при комп'ютерному моделюванні врахувати весь комплекс існуючих факторів у реальних натурних об'єктах (конструктивні й технологічні концентратори, дефекти різної природи, зміни комплексу механіко-фізичних факторів при зміні температури, вологості, радіації). Серед існуючих експериментальних методів механіки деформованого твердого тіла особливе місце займають тензометрія і велика група оптичних методів. Які, у свою чергу поділяються на оптико-геометричні, когерентно-оптичні та поляризаційно-оптичні. Оптико-геометричні методи досліджують НДС об'єктів шляхом деяких геометричних вимірювань, а когерентно-оптичні та поляризаційно-оптичні – аналізом певних інтерференційних картин. Застосування експериментальних методів особливо необхідне та ефективно при дослідженні натурних об'єктів сучасного машинобудування.

Важливою тенденцією створення нових сучасних машин є підвищення питомої ваги багат шарових конструкцій, які завдяки своїй структурі здатні витримувати значні силові навантаження та зміну механіко-фізичних факторів (зміну механічних характеристик унаслідок зміни температури, вологості, радіації). Складовими таких багат шарових структур, наприклад, триплексів часто є неметалічні конструкційні матеріали (неорганічне та органічне скло, епоксидна смола). Крім того, епоксидна смола ЕД-20 служить матрицею композиційних матеріалів вуглепластиків, які знаходять все ширше застосування в авіа- та космічному машинобудуванні. Вказані вище матеріали – прозорі діелектрики, однією з базових фізико-механічних характеристик яких є тензор діелектричної проникності. Ефективним для визначення НДС таких матеріалів є застосування оптичних методів, але, як показано вище, не завжди використання існуючих методів дозволяє отримати коректні результати з необхідною для інженерної практики точністю. Існуючі механічні теорії граничного стану не дозволяють ефективно реагувати на зміну фізичних факторів (температури, вологості, радіації), оскільки вирази для еквівалентного напруження у класичних механічних теоріях при цьому не змінюються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До оптико-геометричних відносяться дзеркально-оптичний метод, метод ділільних сіток, метод тіньових фігур (каустик), метод градієнтної фотопружності [1, 9]. Дія усіх їх базується на певних геометричних вимірюваннях, пов'язаних з відхилення зондуючого променя від свого початкового положення внаслідок деформації об'єкта. Метод тіньових фігур (каустик) та метод градієнтної фотопружності найефективніші з цієї групи оптичних методів як визначення НДС, так і величин КІН біля вершин тріщин. Метод каустик застосовується для експериментального визначення концентрації напружень за наявності значних локальних поверхневих деформацій, нормальних поверхонь.

Метод градієнтної фотопружності розвинено у роботі [15]. Його дія базується на вимірюванні величини рефракції світлового випромінювання в оптично анізотропному середовищі за наявності значних градієнтів напружень. Метод градієнтної фотопружності дозволяє розраховувати величини коефіцієнтів концентрації напружень та КІН, вимірюючи дані рефрактометрії.

Другу велику групу оптичних методів механіки складають оптико-когерентні. До них належать голографічна інтерферометрія, спекл-фотографія, електронна цифрова спекл-інтерферометрія [1, 9]. Спекл-інтерферометрія – один із методів просторової інтерферометрії, дія якого базується на аналізі зернистого зображення об'єкта [9]. Вона базується на аналізі двох спеклів (вихідного та зміщеного стану об'єкта). Для її реалізації необхідна дуже складна апаратура. Метод спекл-фотографії не використовує опорний пучок світла (як це має місце у спекл- та голографічній інтерферометрії). При спекл-фотографії записують та проводять чисельне опрацювання цифрових спеклограм об'єкта в початковому та зміщеному станах.

Третю велику групу оптичних методів експериментальної механіки становлять поляризаційно-оптичні. До них належать фотопружність (з її модифікаціями – фотопластичність, фото-в'язкопружність, радіаційна фотопружність), метод оптично-чутливих покриттів, метод оптично-чутливих вклейок [1, 9]. Поляризаційно-оптичні методи є одними з найбільш розвинених для вирішення найширших класів завдань механіки шляхом оптичного моделювання. Дія методів базується на властивостях деяких прозорих ізотропних матеріалів під навантаженням ставати оптично анізотропними та демонструвати ефект подвійного променезаломлення.

Оптичні методи експериментальної механіки деформованого твердого тіла мають свої області найефективнішого застосування, переваги й недоліки. Для розширення можливостей визначення НДС та граничного стану складних натурних об'єктів, наприклад багат шарових структур з концентраторами, запропоновано нові оптичні експериментально-розрахункові методи [3, 4, 5, 6, 7, 11, 12], модифіковано поляризаційно-оптичний метод для дослідження малих за величиною картин оптичної анізотропії [8, 14], а також запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків [10, 13].

Мета роботи. Розроблення нових оптичних експериментально-розрахункових методів визначення НДС та граничного стану, модифікація поляризаційно-оптичного методу для дослідження об'єктів, виготовлених із оптично малочутливих матеріалів, комплексне дослідження багат шарових структур (триплексів) при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових.

Постановка завдання. Розробити нові оптичні методи, які становлять окрему групу – метод поглинання та метод дифузного поверхневого розсіювання. Запропонувати конструктивні варіанти датчиків деформацій поверхні, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання. Розвинути поляризаційно-оптичний метод для дослідження малих за величиною (до 1λ) картин оптичної анізотропії. Розробити новий фізико-механічний критерій граничного стану – критерій тензора діелектричної проникності (критерій ТДП). За допомогою модифікованого

поляризаційно-оптичного методу та розробленого критерію ТДП провести комплексне дослідження гомогенних та гетерогенних триплексів, з обрамленням і без, при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових частинах (елементах). Для цього дослідити кінетику руйнування неорганічного силікатного скла, проаналізувати дані руйнування органічного скла, змоделювати вплив обрамлення (конструкційний та технологічний на розподіл КІН при проростанні поверхневих тріщин у склеюючому шарі. Оцінити граничний стан триплексів при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових частинах (елементах) і вибрати оптимальну, з точки зору міцності, конструкцію триплекса.

Результати дослідження. Розроблено новий експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища (рис.1) [6, 7, 12]

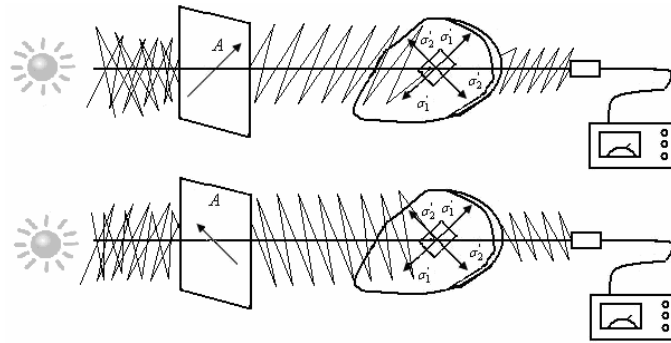


Рисунок 1. Схема вимірювання НДС об'єктів методом, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища

Figure 1. Scheme of the SSS units measurements taking advantage of the method based on the piezooptic effect of absorbing environment

Рівняння Неймана лінійно зв'язують головні значення ТДП з головними деформаціями

$$\begin{cases} \chi_1 = \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_1 + \psi_2 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \\ \chi_2 = \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_2 + \psi_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \\ \chi_3 = \chi_0 + \psi_1 \varepsilon_3 + \psi_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{cases} \quad (1)$$

де ψ_1, ψ_2 – оптико-механічні сталі (за деформаціями)

χ_0 – діелектрична проникність у ненапруженому стані;

χ_1, χ_2, χ_3 – головні значення ТДП у точці напруженого тіла;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації в цій же точці.

Перетворюючи перше з рівнянь системи (1), отримуємо

$$\sqrt{\chi_1} - \sqrt{\chi_0} \approx \frac{(\psi_1 - \psi_2) \varepsilon_1 + \psi_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{2|\chi_0|^2} \sqrt{\chi_0}, \quad (2)$$

де $\sqrt{\chi} = n - i\zeta$, $\sqrt{\chi} = n + i\zeta$ (n – показник заломлення, ζ – натуральний показник поглинання).

Після ряду перетворень, отримуємо

$$(n_1 - n_0) - i(\zeta_1 - \zeta_0) = L_1 \varepsilon_1 + L_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - i \left[\tilde{L}_1 \varepsilon_1 + \tilde{L}_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right] \quad (3)$$

Із залежності (3) випливають рівності дійсних і уявних частин

$$n_1 - n_0 = L_1 \varepsilon_1 + L_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3), \quad (4)$$

$$\zeta_1 - \zeta_0 = \tilde{L}_1 \varepsilon_1 + \tilde{L}_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3), \quad (5)$$

Закон Бугера-Ламберта-Бера описує проходження світла через поглинаюче середовище

$$I = I^* \exp(-4\pi\zeta/\lambda)d, \quad (6)$$

де I^* – інтенсивність світла на вході в середовище;

I – інтенсивність світла на виході з середовища;

λ – довжина хвилі зондуєчого випромінювання;

ζ – натуральний показник поглинання.

Сумісний розв’язок рівнянь (5) і (6), після ряду перетворень, призводить до системи рівнянь для визначення головних деформацій $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$

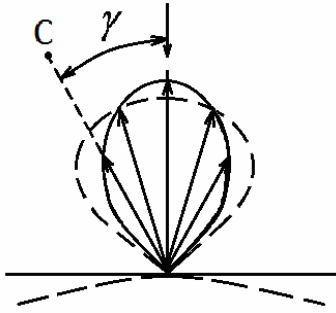
$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{L_1^* \ln(I_0/I_1) - L_2^* [\ln(I_0/I_2) + \ln(I_0/I_3)]}{4\pi d} \\ \varepsilon_2 = \frac{L_1^* \ln(I_0/I_2) - L_2^* [\ln(I_0/I_1) + \ln(I_0/I_3)]}{4\pi d} \\ \varepsilon_3 = \frac{L_1^* \ln(I_0/I_3) - L_2^* [\ln(I_0/I_1) + \ln(I_0/I_2)]}{4\pi d} \end{cases} \quad (7)$$

Метод поглинання застосовано для визначення величин КІН із використанням у якості зондуєчого як поляризованого, так і неполяризованого світла. Для величин КІН K_I, K_{II} отримано систему рівнянь:

$$\begin{cases} K_I = \frac{\sqrt{2\pi r} [M_1^{**} \ln(I_0/I_1) + M_2^{**} \ln(I_0/I_2)]}{4\pi d f^*} \\ K_{II} = \frac{\sqrt{2\pi r} [M_3^{**} \ln(I_0/I_1) + M_4^{**} \ln(I_0/I_2)]}{4\pi d f^*} \end{cases} \quad (8)$$

Метод перевірено на тестових експериментах із визначення НДС для стисненого вздовж осі диска з епоксидної смоли ЕД-20М ($\lambda_1 = 590$ нм, $\lambda_2 = 620$ нм). Похибка експериментально визначених величин напружень та деформацій становить 5,30–7,96%.

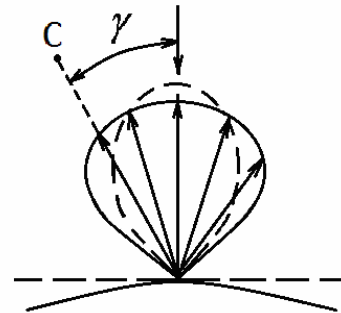
Розроблено новий експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання (МДПР) [3, 4, 5, 11]. Фізична суть методу продемонстрована на рис.8, 9.



- — положення поверхні до деформації об'єкта,
- - - - - — положення після деформації об'єкта.
- — position of the surface before the object deformation
- - - - - — position after the object deformation

Рисунок 2. Збільшення інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого від дифуздорозсіюючої поверхні при збільшенні її кривизни

Figure 2. Increase of the intensity of the diffuse component of the light flow, reflected from the diffuse-scattering surface under its curvature increase.



- — положення поверхні до деформації об'єкта,
- - - - - — положення після деформації об'єкта.
- — position of the surface before the object deformation
- - - - - — position after the object deformation

Рисунок 3. Зменшення інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого від дифуздорозсіюючої поверхні при зменшенні її кривизни

Figure 3. Decrease of the intensity of the diffuse component of the light flow, reflected from the diffuse-scattering surface under its curvature decrease.

Для світлового потоку, відбитого від дифуздорозсіюючої поверхні об'єкта при деформації, яка викликає локальну зміну кривизни його поверхні, можна стверджувати наступне:

- при збільшенні кривизни поверхні інтенсивність дзеркальної складової відбитого світлового потоку зменшується, а дифузної – зростає (рис.2);
- при зменшенні кривизни поверхні інтенсивність дзеркальної складової зростає, а дифузної – зменшується (рис.3).

Математично МДПР може бути описаний для лінійного та двовимірного об'єктів залежностями (9) та (10) відповідно:

$$\Delta k(x) = f\left(\frac{\Delta I}{I_0}\right), \tag{9}$$

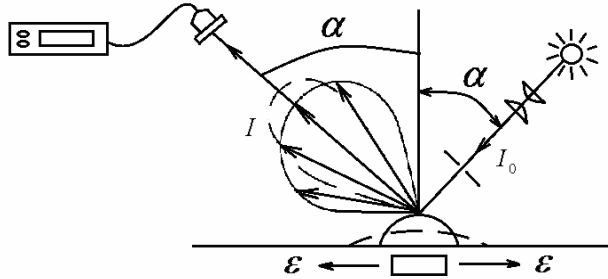
$$\begin{cases} \Delta M_x = D \left[\psi_1 \left(\frac{\Delta I_x}{I_{ox}} \right) + \mu \psi_2 \left(\frac{\Delta I_y}{I_{oy}} \right) \right] \\ \Delta M_y = D \left[\psi_2 \left(\frac{\Delta I_y}{I_{oy}} \right) + \mu \psi_1 \left(\frac{\Delta I_x}{I_{ox}} \right) \right] \end{cases} \tag{10}$$

При застосуванні у якості зондуючого неполяризованого випромінювання отримано залежність

$$(\Delta M_x + \Delta M_y) = D(1 - \mu)\psi \frac{\Delta I}{I_0} \tag{11}$$

У розділі показана можливість застосування МДПР для визначення КІН (моментів), що важливо для моментного напруженого стану оболонок та для оцінювання «зони шийкоутворення» біля вершини тріщини.

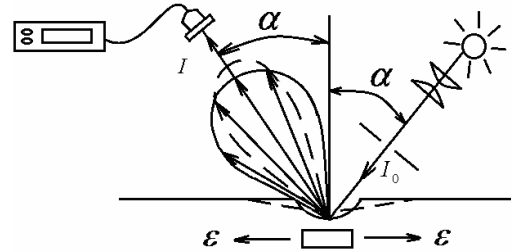
Значний практичний інтерес може становити розроблення оптичних тензодатчиків, які працюють на основі МДПР (рис.4, 5).



- – положення поверхні до деформації об'єкта,
- – положення після деформації об'єкта.
- – position of the surface before the object deformation
- – position after the object deformation

Рисунок 2. Збільшення інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого від дифуздорозсіюючої поверхні при збільшенні її кривизни

Figure 2. Increase of the intensity of the diffuse component of the light flow, reflected from the diffuse-scattering surface under its curvature increase.



- – положення поверхні до деформації об'єкта,
- – положення після деформації об'єкта.
- – position of the surface before the object deformation
- – position after the object deformation

Рисунок 3. Зменшення інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого від дифуздорозсіюючої поверхні при зменшенні її кривизни

Figure 3. Decrease of the intensity of the diffuse component of the light flow, reflected from the diffuse-scattering surface under its curvature decrease.

Метод підтверджено на рівні тестових експериментів. Похибки експериментально визначених параметрів НДС не перевищували 8%.

У роботах [10, 13] наведено дані з розроблення нового критерію граничного стану діелектриків – фізико-механічного критерію діелектричної проникності (критерію ТДП). Це єдиний критерій, у якому при зміні комплексу фізичних факторів (температури, радіації, вологості) змінюється не лише величина границі міцності σ^* (як у відомих механічних теоріях граничного стану), а й вираз для еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ за рахунок зміни величини співвідношення оптико-механічних констант C_1/C_2

$$\sigma_{екв} = \frac{C_1}{C_2} \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \quad (12)$$

Розвинено поляризаційно-оптичний метод для визначення величин КІН K_I , K_{II} , K_{III} для неоднорідного основного напруженого стану й малих (до 1λ) і великих ($>8\lambda$) картин оптичної анізотропії та значних градієнтів, коли важко визначити нульову ізодрому [8, 14].

Компоненти додатково напруженого стану σ_{ij} пов'язані з компонентами загального напруженого стану σ'_{ij} і компонентами основного напруженого стану σ_{ij}^0 залежністю

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \sigma_{ij}^0. \quad (13)$$

Проводячи вимірювання оптичної анізотропії в двох точках, які знаходяться в області дії пружної асимптотики Ірвіна-Вастергаарда, та враховуючи, що градієнт параметрів основного напруженого стану набагато менший градієнта параметрів загального напруженого стану ($\sigma_{ij(1)}^0 - \sigma_{ij(2)}^0 \approx 0, \tau_{ij(1)}^0 - \tau_{ij(2)}^0 \approx 0$), після ряду перетворень отримаємо систему рівнянь для визначення КІН K_I і K_{II}

$$\begin{cases} K_I = \frac{A_1(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_2 \cos 2\varphi_2) + B_1(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \\ K_{II} = \frac{A_2(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_2 \cos 2\varphi_2) + B_2(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \end{cases}. \quad (14)$$

У системі (14) A_1, B_1, A_2, B_2 – вирази, величини яких залежать від кута, що визначає радіус-вектор точки вимірювання;

δ_1, δ_2 – оптичні різниці ходу, виміряні в двох точках;

φ_1, φ_2 – параметри ізоклини;

r_1, r_2 – радіус-вектори точок вимірювання.

Якщо радіус-вектори точок вимірювання перпендикулярні до осі тріщини, то система (14) матиме вигляд

$$\begin{cases} K_I = \frac{\sqrt{r_l}}{Cd} \{A_1(\delta_l \cos 2\varphi_l - \delta_0 \cos 2\varphi_0) + B_1(\delta_l \sin 2\varphi_l - \delta_0 \sin 2\varphi_0)\} \\ K_{II} = \frac{\sqrt{r_l}}{Cd} \{A_2(\delta_l \cos 2\varphi_l - \delta_0 \cos 2\varphi_0) + B_2(\delta_l \sin 2\varphi_l - \delta_0 \sin 2\varphi_0)\} \end{cases}. \quad (15)$$

Визначення КІН K_{III} для довільного випадку НДС поблизу берегів тріщини (за наявності всіх трьох КІН: K_I, K_{II}, K_{III}) можливе при косому просвічуванні (рис.6) та на субзрізах (рис.7)

Використовуючи дані фотопружних вимірювань у т.1, 2 при косому просвічуванні (рис.6) для визначення K_{III} , одержуємо вираз

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd_1(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2}) \cos 2\alpha \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} - \frac{1}{2} \left\{ K_I \operatorname{ctg} \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\nu - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2}\right) - K_{II} \left(2 - 2\nu + \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2}\right) \right\} \operatorname{tg} 2\alpha \quad (16)$$

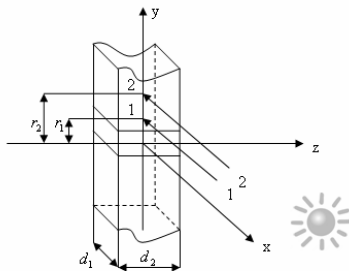


Рисунок 7. Субзріз для визначення величин КІН K_{III}

Figure 7. Subcut for finding SIF K_{III}

При дослідженні на субзрізах (рис.7) $\alpha=0$. Тоді для визначення K_{III} отримаємо вираз

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd_1(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad (17)$$

При $\theta = \frac{\pi}{2}$ формула (7) набуде вигляду

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\pi}{Cd_1}} \frac{(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (24)$$

Результати тестових експериментів для склопластинок з крайовими тріщинами при розтягу та триточковому згині дають розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними до 10%.

На основі модифікованого поляризаційного оптичного методу та розробленого фізико-механічного критерію ТДП граничного стану діелектриків проведено комплексне дослідження багат шарових структур (триплексів) при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових частинах (елементах). Результати визначення напруженого стану чотирьох конструктивних варіантів триплексів при температурі $T=213\text{ K}$, а також розподілу еквівалентних напружень, розрахованих згідно з фізико-механічним критерієм ТДП, наведено у вигляді графіків на рис.8–11.

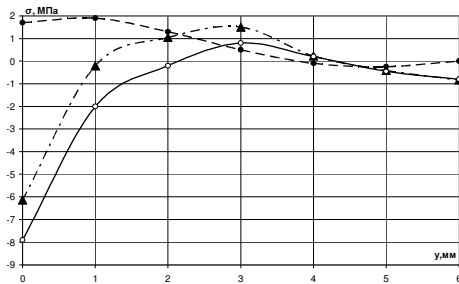


Рисунок 8. Розподіл напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ у гомогенному триплексі без обрамлення (зразок 1) при $T=213\text{K}$.

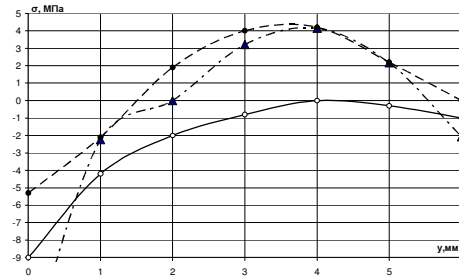


Рисунок 9. Розподіл напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ у гомогенному триплексі з обрамленням (зразок 2) при $T=213\text{K}$.

Figure 8. Stress distribution $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ in homogeneous triplex without frame (sample 1) at $T = 213\text{K}$.

Figure 9. Stress distribution $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ in homogeneous triplex with frame (sample 2) at $T = 213\text{K}$.

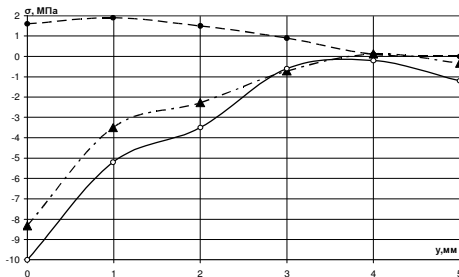


Рисунок 10. Розподіл напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ у гетерогенному триплексі без обрамлення (зразок 3) при $T=213\text{K}$.

Figure 10. Stress distribution $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ in heterogeneous triplex without frame (sample 3) at $T = 213\text{K}$.

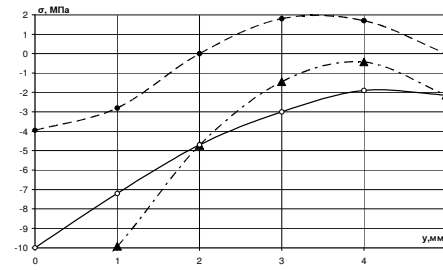


Рисунок 11. Розподіл напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ у гетерогенному триплексі з обрамленням (зразок 4) при $T=213\text{K}$.

Figure 11. Stress distribution $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{екв}$ in heterogeneous triplex with frame (sample 4) at $T = 213\text{K}$.

Для різних конструктивних виконань триплексів при $T=213\text{K}$ величини еквівалентних напружень визначені згідно з фізико-механічним критерієм ТДП дорівнюють:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{екв1}}^* (y=3 \text{ мм}) &= 1,50 \text{ МПа (гомогенний триплекс без обрамлення);} \\ \sigma_{\text{екв2}}^* (y=4 \text{ мм}) &= 4,14 \text{ МПа (гомогенний триплекс з обрамленням);} \\ \sigma_{\text{екв3}}^* (y=4 \text{ мм}) &= 0,08 \text{ МПа} \approx 0 \text{ (гетерогенний триплекс без обрамлення);} \\ \sigma_{\text{екв4}}^* (y=4 \text{ мм}) &= -0,43 \text{ МПа} \approx 0 \text{ (гетерогенний триплекс з обрамленням).}\end{aligned}$$

З точки зору міцності неорганічного силікатного скла, гетерогенні триплекси з обрамленням і без нього практично еквівалентні. А міцність склеюючого шару визначається дотичними напруженнями. Згідно з проведеними дослідженнями, мають місце співвідношення величин дотичних напружень

$$\frac{\tau_{\text{max}4}}{\tau_{\text{max}3}} = 2,52, \quad \frac{\tau_{\text{max}2}}{\tau_{\text{max}1}} = 2,65 \quad (\text{при } T=213 \text{ К}).$$

Таким чином, обрамлення викликає збільшення напружень у склеюючому шарі в 2,52 – 2,65 рази, а величина стримуючого впливу на поверхневі дефекти дорівнює 1,57, що суттєво менше за величиною.

Виходячи з проведеного комплексу досліджень, можна зробити висновок, що найоптимальнішою конструкцією триплексу є гетерогенний триплекс без обрамлення (зразок 3), за ним – слідує гетерогенний триплекс з обрамленням (зразок 4), за ним – гомогенний триплекс без обрамлення (зразок 1), і найнебезпечніше з точки зору міцності – конструктивне вирішення триплексу у вигляді гомогенного триплекса з обрамленням (зразок 2). У випадку нашого дослідження, при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у складових частинах (елементах) триплексів при охолодженні до $T=213 \text{ K}$, гетерогенність є позитивним фактором, а обрамлення – негативним.

Висновки. Розроблено нові оптичні експериментально-розрахункові методи визначення НДС елементів машин та конструкцій, метод поглинання та метод дифузного поверхневого розсіювання, які становлять окрему групу існуючих оптичних методів. Запропоновано варіанти датчиків деформацій поверхні, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання. Причому, датчик поверхні, активним елементом якого є виїмка з дифузно відбиваючою поверхнею, є одним з датчиків деформацій, який не кріпиться певним чином на поверхні об'єкта, а є частиною приповерхневого шару. Модифіковано поляризаційно-оптичний метод для дослідження малих за величиною картин оптичної анізотропії (до 1λ). Розроблено фізико-механічний критерій ТДП. Це єдиний критерій, у якому вираз для еквівалентного напруження не є сталим, а змінюється зі зміною величини співвідношення оптико-механічних констант C_1/C_2 . На основі модифікованого поляризаційно-оптичного методу та фізико-механічного критерію граничного стану (критерію ТДП) проведено комплексне дослідження НДС та граничного стану триплексів різного конструктивного виконання при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх елементах при температурі $T=213 \text{ K}$ і вибрано оптимальну конструкцію.

Conclusions. The authors developed new optical experimental and computational methods for determining SSS of the machines and structures element, absorption method and diffuse surface scattering method, which consist of a separate group of existing optical methods. They proposed options of surface strain sensors operating on the effect of diffuse surface scattering. Moreover, the surface sensor, which has notch with diffusely reflecting surface as an active element, is the only strain sensor, that is not attached in some way to the surface of the object, but is a part of a surface layer. The polarization optical method was modified for the purpose of studying small cases of optical anisotropy (up to 1λ). Criterion of

physical and mechanical DPT was developed. This is the only criterion in which the expression for the equivalent stress is not constant, but varies with the change of the values of optical-mechanical constants C_1/C_2 ratio. Based on the modified polarization optical method and physical mechanical criterion of boundary state (DPT criterion) the authors conducted a comprehensive study of the SSS and the boundary state of triplexes of various design modifications with the possible presence of crack-like defects in their elements at temperature $T=213$ K and selected the optimum design.

Список використаної літератури

1. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела [Текст] / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
2. Мильников, О.В. Дослідження напружено-деформованого стану триплексів при експлуатації в умовах знижених температур [Текст] / О.В. Мильников, М.І. Підгурський // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – №2 (66). – С. 52 – 62.
3. Оптические тензодатчики на основе эффекта диффузного поверхностного рассеивания [Текст] / Н.И. Пидгурский, Ю.А. Рудяк, И.Н. Пидгурский и др. // Вестник Ташкентского технического университета. – 2013. – № 1 (49). – С. 33 – 35.
4. Пат. А.с. СССР, М 5 кл. G 01B 11/16 Способ определения деформаций поверхности [Текст] / Рудяк Ю.А. – № 1716317 от 01.11.1991.
5. Пат. А.с. СССР, М 5 кл. G 01B 11/16 Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта [Текст] / Рудяк Ю.А., Пизар В.Г. – № 1668860 от 08.04.1991.
6. Пат. А.с. СССР, М 5 кл. G 01B 11/18 Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта [Текст] / Мильников А.В., Рудяк Ю.А. – № 1578460 от 15.03.1990.
7. Пат. А.с. СССР, М 5 кл. G 01B 11/18. Способ определения параметров напряженно-деформированного состояния объекта [Текст] / Рудяк Ю.А. – № 1670388 от 15.04.1991.
8. Підгурський, М. Розвиток наскрізних тріщин в гнutoзварних тонкостінних елементах коробчастого профілю [Текст] / М. Підгурський, М. Шашків // Вісник ТДТУ. – 2006. – Т. 11, – № 4. – С. 78 – 86.
9. Разумовский, И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела [Текст] / И.А. Разумовский. – М.: изд. МГТУ им. Баумана, 2007. – 237 с.
10. Рудяк, Ю. Критеріальне оцінювання ресурсу полімерних елементів машин [Текст] / Ю. Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – № 4(68). – С. 88 – 91.
11. Рудяк, Ю. Фізичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання [Текст] / Ю. Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – № 1 (69). – С. 110 – 115.
12. Рудяк, Ю.А. Визначення КІН методом поглинання [Текст] / Ю.А. Рудяк, В.І. Дрозд // Тези доп. І наук.-техн. конф. ТПІ «Прогресивні технології і обладнання в машино- і приладобудуванні». – Тернопіль, 1992. – С. 93.
13. Рудяк, Ю.А. Граничний стан елементів машин та конструкцій з діелектриків, коли руйнування проходить в умовах плоскої деформації [Текст] / Ю.А. Рудяк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 4 (193). – С. 224 – 226.
14. Рудяк, Ю.А. Метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для неоднорідного основного напруженого стану [Текст] / Ю.А. Рудяк // Вісник національного авіаційного університету. – Київ, 2012. – № 4. – С. 101 – 103.
15. Удалов, Е.П. Исследование градиентных полей напряжений в фотоупругих моделях по рефракции светового излучения: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04. «Механика деформированного твердого тела» [Текст] / Е.П. Удалов. – Киев, 1989. – 136 с.

Отримано 16.12.2013