

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

РУДЯК Юрій Аронович

УДК 539.375:519.6

ОПТИЧНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ
ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО ТА
ГРАНИЧНОГО СТАНІВ ПРОЗОРИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Тернопіль 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі технології та обладнання зварювального виробництва Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Підгурський Микола Іванович**, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри технології та обладнання зварювального виробництва

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Ориняк Ігор Володимирович**, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, завідувач відділу фізичних основ міцності та руйнування, м.Київ

доктор технічних наук, професор **Будак Валерій Дмитрович**, Миколаївський національний університет ім. В.О. Сухомлинського, ректор, м. Миколаїв

доктор технічних наук, професор **Шваб'юк Василь Іванович**, Луцький національний технічний університет, професор кафедри технічної механіки, м. Луцьк

Захист відбудеться «___» _____ 2015 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради **Д58.052.01** у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, навчальний корпус №2, аудиторія №79.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «___» _____ 2015 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д58.052.01



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При роботі сучасної техніки деталі машин та конструкцій знаходяться під дією значних силових навантажень та при різних температуровологісних режимах, що зумовлює вирішення проблеми їх надійності. Задачі такого плану не завжди вдається розв'язати за допомогою аналітичних та чисельних методів. Крім того, все ширше як конструкційні матеріали застосовують неметали (неорганічне силікатне скло, органічне скло, такі конструкційні елементи машин як гомогенні та гетерогенні триплекси, полімери), які працюють у певних діапазонах температур та вологості. Для вирішення поставлених завдань необхідне застосування експериментальних методів, але існуючий їх рівень не завжди дозволяє одержати шукані результати.

Надійність роботи сучасної техніки, її функціональні можливості залежать від ефективної оцінки НДС і граничного стану елементів машин та конструкцій, особливо при наявності геометричних та технологічних концентраторів. Надзвичайно високу ефективність рішення такого плану задач, демонструють, особливо в останні роки, аналітико-чисельні методи. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють моделювати елементи машин та будівельних конструкцій оптимальної геометрії, мінімальної матеріалоемності та підвищеної надійності. Великі успіхи досягнуті у комп'ютерному моделюванні задач механіки руйнування (процесів розвитку поверхневих та наскрізних тріщин, зони передруйнування та «шийкоутворення»). Одержані аналітично (і розраховані чисельно) результати стають базисом для створення банку даних при проектуванні апаратів та вузлів машин. Але, при беззаперечних успіхах аналітико-чисельних методів, існує практична необхідність і у розвитку експериментальних методів. Це пов'язано з тим, що аналітичне рішення буде настільки точним, наскільки повно враховано у базовій гіпотезі всі існуючі чинники. А це досить важко зробити для складних натурних об'єктів.

Застосування експериментальних методів, у сучасних умовах, найбільш ефективно у трьох напрямках: дослідження натурних об'єктів; як тестові задачі при розробці нових аналітичних методів; для одержання експериментальних даних, які, у комплексі з числовими методами, дозволяють підвищити точність та достовірність аналітичних рішень.

Важливою тенденцією розвитку сучасного машинобудування є підвищення ролі та збільшення питомої ваги неметалів (епоксидних смол, неорганічного та органічного скла) у якості конструкційних матеріалів. Всі ці матеріали – прозорі діелектрики, однією з базових фізико-механічних характеристик яких є тензор діелектричної проникності (ТДП). Існуючі експериментальні методи, включаючи оптичні, у їх класичних підходах не завжди дозволяють знаходити ефективні рішення визначення НДС та граничного стану для таких об'єктів.

Отже, підвищення ефективності та функціональних можливостей експериментальних досліджень шляхом розробки експериментально-розрахункових оптичних методів визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків на основі аналізу параметрів тензора діелектричної проникності є актуальною і надзвичайно важливою проблемою.

Вирішенню такої актуальної наукової проблеми і присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи пов'язані з науковими дослідженнями, що виконувались у лабораторіях оптичних методів експериментальної механіки кафедри механіки суцільного середовища механіко-математичного факультету Київського державного університету ім. Т.Г.Шевченка: «Исследование поляризационно-оптическим методом напряженного состояния трубчатых узлов при наличии дефектов различной геометрии» г/р 01880046569, 1989; кафедри технічної механіки Тернопільського приладобудівного інституту: «Исследование коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) в образцах электровакуумных стекол» № г/р 01870097984, 1988; «Разработка методов измерения больших значений ($\delta \geq 20\lambda$) оптической разности хода применительно к волокнам световодов и заготовкам» № г/р 01880053570, 1989; «Исследование возможности измерения компонент тензора напряжений при косом просвечивании заготовок световодов» № г/р 01890077485; «Определение кинетики длительной прочности электровакуумного стекла» № г/р 0189007786, 1990, Тернопільського державного медичного університету імені І.Я.Горбачевського «Системи дослідження та інформаційні технології у задачах медичної науки» № д/р 0113U001800, 2013-2015; Науково-навчального центру «Фізико-хімічне матеріалознавство» Київського національного університету ім. Т.Г.Шевченка та Національної академії наук України «Створення нових наноконпозиційних дисперсно зміцнених сплавів для потреб ядерної промисловості на основі систем гафній-бор, гафній-оксид ітрію методом аргано-дугової плавки» № д/р 0113U003455, 2013 р., у рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки на 2013 р.».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка експериментально-розрахункових оптичних методів визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків на основі аналізу параметрів тензора діелектричної проникності.

Для її досягнення необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити метод визначення НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища (метод поглинання), і дія якого базується на аналізі зміни уявної частини компонент тензора діелектричної проникності (показника поглинання) при навантаженні об'єкта. Метод повинен дозволити визначати НДС об'єктів із непрозорих у видимому діапазоні діелектриків і встановити квазіголовні напруження і деформації, а не їх лінійні комбінації, як у поляризаційно-оптичних (різниці) та когерентно-оптичних (суми) методах;
- застосувати запропонований метод поглинання для визначення величин КІН для об'єктів з тріщинами;
- розробити експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який використовує ефект дифузного поверхневого розсіювання (метод дифузного поверхневого розсіювання – МДПР) і ґрунтується на вимірюваннях

перерозподілу інтенсивностей дзеркальної та дифузних складових розсіяного поверхневого об'єкта світлового потоку за локальної зміни його кривизни;

- застосувати запропонований метод дифузного поверхневого розсіювання для визначення величин КІН (моментів), які характеризують моментний стан об'єктів з тріщинами;
- розробити та реалізувати моделі оптичних датчиків деформацій поверхні, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання у двох конструктивних виконаннях: у одному з яких чутливим елементом є вигнута пластинка, а у другому – виїмка з дифузновідбиваючою поверхнею. Причому датчик, чутливим елементом якого є виїмка, не кріпиться певним чином на поверхню об'єкта, а є частиною приповерхневого шару;
- розробити фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків (критерій тензора діелектричної проникності – ТДП). Критерій базується на зміні компонент тензора діелектричної проникності при навантаженні об'єкта, що дозволяє інтегрально враховувати вплив механічних та фізичних чинників (температури, вологості, радіації) на граничний стан діелектриків. Це критерій граничного стану, у якому при зміні фізичних факторів змінюється не лише границя міцності (як у класичних механічних критеріях), а і вираз для еквівалентного напруження;
- встановити основні закономірності довготривалої міцності полімерів за допомогою фізико-механічного критерію ТДП;
- розвинути (модифікувати) поляризаційно-оптичний метод для визначення величин K_I , K_{II} , K_{III} для неоднорідного основного напруженого стану та малих за величиною картин оптичної анізотропії (до 1λ , де λ – довжина хвилі зондуємого випромінювання);
- розвинути поляризаційно-оптичний метод визначення НДС, який використовує дві або чотири довжини хвилі зондуємого випромінювання для визначення величин КІН у об'єктах з тріщинами для випадків великих різниць оптичного ходу променів ($\delta > 8\lambda$) та значних градієнтів, коли метод смуг та компенсаційні методи важко застосувати;
- дослідити та проаналізувати кінетику руйнування та граничний стан (за допомогою запропонованого критерію ТДП) неорганічного силікатного скла, як складової частини гомогенних та гетерогенних триплексів;
- проаналізувати за допомогою критерію ТДП дані руйнування органічного скла, як складової частини гетерогенних триплексів;
- на моделях з епоксидної смоли змодельовати конструктивний та технологічний вплив обрамлення на розподіл КІН при проростанні поверхневих тріщин (надрізів) у наскрізні у склеюючому шарі;
- за допомогою модифікованих методик поляризаційно-оптичного методу та розробленого фізико-механічного критерію тензора діелектричної проникності провести комплексне дослідження напруженого та граничного стану за знижених температур (до $T=213K$) багат шарових структур (гомогенних та гетерогенних триплексів) з обрамленням і без, та при можливій наявності дефектів типу тріщин у складових частинах (елементах) триплексів;

неорганічному силікатному склі, органічному склі та склеюючому шарі. На основі проведеного дослідження визначити вплив гетерогенності та обрамлення і одержати чисельні результати оцінки НДС та граничного стану для різних варіантів триплексів і вибрати оптимальний.

Об'єктом дослідження є прозорі діелектрики, елементи конструкцій з конструктивними, геометричними та технологічними концентраторами з епоксидної смоли, неорганічне силікатне скло з тріщинами, органічне скло з тріщинами, гомогенні та гетерогенні триплекси.

Предметом дослідження є методи та критерії визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків (НДС, КІН та граничний стан елементів конструкцій з епоксидної смоли, органічного та неорганічного скла, гомогенних та гетерогенних триплексів).

Методи дослідження. Аналітичні та експериментальні дослідження базуються на положеннях механіки суцільного середовища та механіки руйнування, сучасних уявленнях про фізику процесу взаємодії світла з середовищем, базових рівняннях зв'язку параметрів ТДП та НДС. Застосовано методи об'ємної фотопружності з використанням «заморожування деформацій», мікрональної фотопружності.

Моделі із епоксидної смоли досліджувались поляризаційно-оптичним методом на координатно-синхронних поляриметрах КСП-7 та КСП-10. Вивчення кінетики руйнування неорганічного силікатного скла здійснювалось на агрегатних поляризаційних мікроскопах ПОЛАМ Р-312 та ПОЛАМ Л-211. Напружений стан гомогенних та гетерогенних триплексів при знижених температурах досліджувався за допомогою поляриметра КСП-7. Для реалізації розтягу та триточкового згину було сконструйовано спеціальні пристрої для мікроскопу. Для моделювання різних температуро-вологісних режимів було сконструйовано спеціальні термокамери. При розробці нових оптичних експериментально-розрахункових методів використовувались концентраційний фотоелектроколориметр КФК-2, прес У-7, стабілізований регульований блок живлення «АГАТ», стабілізований вимірювач потужності оптичного вимірювання «Кварц-1», катетометр КМ-8. При дослідженнях застосовувались стандартизовані матеріали (оргскло різних модифікацій), а також моделі, на базі епоксидно-діанової смоли, характеристики яких перевірялись акустичним способом.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища (метод поглинання), дія якого базується на аналізі зміни уявної частини компонент тензора діелектричної проникності (коефіцієнта поглинання) при навантаженні об'єкта (А.С.№ 1578460, А.С.№ 1670388), що дало змогу розширити функціональні можливості експериментальних досліджень непрозорих у видимому діапазоні матеріалів, а також відразу, без додаткових експериментів та обчислень, визначати окремо квазіголовні напруження і деформації, а не їх лінійні комбінації, як у існуючих методах.

2. Розроблено експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який використовує ефект дифузного поверхневого розсіювання (метод дифузного поверхневого розсіювання), дія якого базується на перерозподілі інтенсивностей дзеркальної та дифузних складових розсіяного поверхнею об'єкта світлового потоку при локальній зміні його кривизни (А.С.№ 1668860), це надало можливість безпосереднього визначення кінетики зміни моментного стану об'єктів.
3. Створено та реалізовано моделі оптичних тензодатчиків, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання (А.С. № 1716317), що дозволило підвищити ефективність експрес-визначення деформацій поверхні об'єктів.
4. Модифіковано (розвинуто) поляризаційно-оптичний метод для вирішення задач механіки руйнування (визначення КІН K_I , K_{II} , K_{III}) для випадків малих за величиною картин оптичної анізотропії (до 1λ) та неоднорідного основного напруженого стану, а також для випадків значних градієнтів і великих значень оптичної анізотропії ($>8\lambda$), коли важко визначити нульову ізохрому, а компенсаційні методи дають значну похибку, що розширило функціональні можливості застосування поляризаційно-оптичного методу для визначення НДС натурних прозорих об'єктів, виготовлених з оптично малочутливих матеріалів, наприклад, неорганічного силікатного скла, а також для випадків високоградієнтних полів напружень.
5. Запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків (критерій тензора діелектричної проникності). Критерій базується на зміні компонент тензора діелектричної проникності при навантаженні об'єкта. Критерій дозволяє інтегрально враховувати вплив фізичних факторів на механічний стан об'єкта. При зміні фізичних чинників (температури, вологості, радіації) змінюється не лише границя міцності (як у класичних механічних критеріях), а і вираз для еквівалентного напруження за рахунок зміни величини співвідношення оптико-механічних констант C_1/C_2 ; застосування запропонованого критерію дозволило більш точно оцінювати граничний стан діелектриків з врахуванням як механічних, так і фізичних чинників.
6. За допомогою модифікованих методик поляризаційно-оптичного методу та розробленого фізико-механічного критерію тензора діелектричної проникності проведено комплексне дослідження напруженого та граничного стану гомогенних та гетерогенних триплексів, з обрамленням і без, при можливій наявності дефектів типу тріщин у складових частинах (елементах) триплексів: неорганічному силікатному склі, органічному склі та склеюючому шарі, що дало змогу визначити вплив гетерогенності та обрамлення і одержати чисельні результати оцінки НДС та граничного стану для різних варіантів триплексів і вибрати оптимальний.

Достовірність результатів проведених досліджень забезпечується коректним використанням аналітичного і експериментального апарату, строгістю постановок задач; відповідністю висновків і отриманих результатів фізичній суті досліджуваних явищ; прийняттям обґрунтованих фізико-механічних моделей,

порівнянням деяких експериментально одержаних результатів з даними інших авторів, одержаними як експериментально, так і теоретично.

Практичне значення одержаних результатів:

- розвиток поляризаційно-оптичного методу рішення задач механіки руйнування дав можливість застосувати його для одержання ряду характеристик НДС та КІН на моделях елементів машин та при дослідженні натурних матеріалів;
- теоретично обґрунтований та експериментально реалізований оптичний експериментально-розрахунковий метод визначення НДС та КІН, який базується на п'єзооптичному ефекті поглинаючого середовища, може бути базисом для створення серійної оптичної апаратури і значно розширити можливості експериментального рішення задач інженерної практики;
- теоретично обґрунтований та експериментально реалізований оптичний експериментально-розрахунковий метод визначення НДС та КІН (моментів), який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання, може бути базисом для створення серійної оптичної апаратури і значно розширити можливості експериментального рішення задач інженерної практики, включаючи новий напрямок оптичної тензометрії;
- теоретично обґрунтовано та експериментально перевірено на ряді експериментів фізико-механічний критерій ТДП граничного стану, що створило додаткові можливості для оцінки запасу міцності елементів машин і конструкцій, виготовлених з діелектриків;
- проведено комплексне дослідження НДС та граничного стану багатошарових структур (триплексів) при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових частинах (елементах), що важливо для оцінки запасу міцності ілюмінаторів літаків, підводних човнів, оглядових вікон апаратів харчової промисловості;
- конкретні одержані чисельні значення для величин КІН разом із запропонованим критерієм граничного стану надали можливість оцінити запас міцності газопроводів та газорегуляторних установок УГРШТ та ПГРШ (ТОВ «ТеХС», м.Тернопіль, акт впровадження № 4/ 21 від 17.04.2014 р.) та корпусів фільтрів газорегуляторних фільтрів шафового типу ПГРШ та УГРШТ (ТОВ «ТОПАЗ 99», м.Харків, акт впровадження № 5/ 17 від 23.05.2014 р.)
- одержані результати з руйнування неорганічного силікатного скла, органічного скла, розрахунку НДС та оцінки граничного стану гомогенних та гетерогенних триплексів, з обрамленням та без, передані для використання в Департамент агропромислового розвитку Тернопільської ОДА.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи, що пов'язані з розробкою теоретичних основ та технічної реалізації нових експериментально-розрахункових методів визначення НДС та граничного стану прозорих діелектриків на основі аналізу параметрів ТДП, формулювання всіх основних положень, що визначають наукову новизну роботи, а також її практичне значення отримані автором самостійно. Автор брав безпосередню участь у всіх етапах експериментальних досліджень. Частина експериментальних результатів отримана за участю співробітників лабораторії оптичних методів дослідження

НДС КДУ, ТНТУ, ННЦ «Фізико-хімічне матеріалознавство» КНУ та НАН України, яким автор висловлює глибоку подяку за допомогу в роботі.

У роботах [4, 10, 11, 25, 33, 34, 35, 36, 43, 45, 46, 47, 49] автору належить ідея та теоретичне обґрунтування критерію граничного стану діелектриків, участь у експериментальних дослідженнях та аналізі одержаних результатів. У роботах [2, 15, 18, 27, 30, 32, 34, 35, 48] автору належить ідея та математичний апарат методу дифузного поверхневого розсіювання та створення датчиків деформацій поверхні, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання, участь у експериментальних дослідженнях і аналізі одержаних результатів. У роботах [2, 12, 25, 28, 31, 34, 35, 37, 38, 39, 42] автору належить ідея та математичний апарат методу визначення НДС об'єктів шляхом вимірювання поглинання світла, участь у експериментальних дослідженнях та аналізі одержаних результатів. У роботах [3, 37, 41, 43, 45, 46] автору належить ідея та математичний апарат модифікації поляризаційно-оптичного методу для визначення величин КІН у випадку малих за величиною картин оптичної анізотропії, участь у проведенні експериментальних досліджень, аналізі одержаних результатів. У роботах [3, 49] автору належить ідея застосування модифікованого поляризаційно-оптичного методу для натурного дослідження та моделювання напруженого стану елементів інженерних конструкцій з концентраторами, участь у проведенні експерименту і аналізі отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на Республіканській науково-технічній конференції “Вопросы повышения надежности машин и сооружений” (Запоріжжя, 1988р.); XI Всесоюзній конференції “Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов” (Обнінськ, 1988р.); XIII Науковій конференції молодих вчених Інституту механіки АН УРСР (Київ, 1988р.); Науково-технічній конференції молодих вчених “Повышение надежности машин” (Горький, 1989р.); Обласній науково-технічній конференції “Повышение качества и надежности машиностроительной продукции” (Луцьк, 1989р.); III Всесоюзному симпозиумі “Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии” (Житомир, 1989р.); Обласній науковій конференції “Прогрессивные технологические процессы в машиностроении и стимулирование их внедрения в производство” (Харків, 1990р.); Республіканському науково-практичному семінарі “Лучевая обработка композиционных материалов в технике” (Тернопіль, 1990р.); Всесоюзній науково-технічній конференції “Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических средств” (Миколаїв, 1991р.); III Всесоюзній науковій конференції “Механика неоднородных структур” (Львів, 1991р.); I Науково-технічній конференції ТПІ “Прогресивні технології і обладнання в машино- і приладобудуванні” (Тернопіль, 1992р.); IX Науково-технічній конференції “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение” (Москва, 1992р.); XV SYMPOZJUM MECHANIKI EKSPERYMENTALNEJ CIAŁA STAŁEGO (JACHRANKA, 1992); Міжнародному симпозиумі “Механика эластомеров” (Севастополь, 1994р.); 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIMENTAL MECHANICS (LISBON, 1994); II Міжнародній науково-

технічній конференції “Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті” (Тернопіль, 2013р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Розвиток наукових досліджень «2013»” (Полтава, 2013), IV Міжнародній науково-практичній конференції “Інноваційні технології на залізничному транспорті” (Париж, 2013р.), II Міжнародної Інтернет-конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій» (Вінниця, 2014), X Міжнародній науково-практичній конференції “Наукові дослідження – теорія та експеримент 2014” (Полтава, 2014).

Результати дисертаційної роботи доповідались на науковому семінарі «Матеріалознавство та технології неоднорідних систем» Навчально-наукового центру «Фізико-хімічне матеріалознавство» Київського національного університету імені Т. Шевченка та Національної академії наук України (2014 р.); на науковому семінарі Київського педагогічного університету (2014 р.), на науковому тематичному семінарі “Механіка, міцність матеріалів і конструкцій” Тернопільського національного технічного університету (2014 р.), на науково-технічному семінарі Миколаївського національного університету (2014 р.), на науково-технічному семінарі відділу фізичних основ міцності та руйнування Інституту проблем міцності НАН України (2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 64 публікаціях, з них 2 – монографії, 32 – статті, 4 – авторські свідоцтва на винаходи, 26 – тези конференцій. Загалом 28 публікацій [1-28] (включаючи 3 авторських свідоцтва [26-28]) відповідають вимогам МОН України щодо публікацій результатів дисертаційних робіт у фахових наукових виданнях. 2 статті [3, 4] опубліковані у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 5 статей [5-9] опубліковано у фахових виданнях іноземних держав (одна з них [5] у електронному фаховому журналі, який включений до міжнародної наукометричної бази). Одноосібних робіт 21 [1, 5, 6, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 31, 44, 47].

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, переліку посилань із 296 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації – 315 сторінок (основний текст – 284 машинописних сторінок, 142 рисунки, 41 таблиця).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і важливість проблеми підвищення ефективності та функціональних можливостей експериментальних досліджень шляхом розробки нових експериментально-розрахункових оптичних методів визначення напружено-деформованого та граничного стану, сформульовано мету та задачі дослідження, охарактеризовано новизну отриманих результатів і їх практичну цінність, наведено дані про апробацію результатів досліджень і публікації, що відображають основний зміст роботи.

У першому розділі за літературними джерелами проаналізовано сучасний стан аналітичних, чисельних та експериментальних методів визначення НДС, КІН, граничного стану елементів машин та конструкцій. Розглянуто стан та перспективи розвитку оптичних методів механіки деформівного твердого тіла.

На основі аналізу літературних джерел обґрунтовано вибір теми та напрямків досліджень.

Розглянуто тенденції розвитку аналітико-чисельних та експериментальних методів механіки. Відзначено, що незважаючи на значні успіхи аналітико-чисельних методів, особливо при вражаючих можливостях сучасного комп'ютерного моделювання, експериментальні методи не втратили своєї актуальності, особливо для дослідження натурних об'єктів.

Важливим напрямком сучасної механіки деформівного твердого тіла є механіка руйнування тіл з дефектами, невід'ємним елементом якої є визначення величин КІН, що визначають розподіл напружень в околі тріщин та включень. Фундаментальним дослідженням в області міцності, втоми та тріщиностійкості матеріалів присвячені роботи Андрейківа О.Є., Бережницького Л.Т., Божидарніка В.В., Болотіна В.В., Ботвіної Л.Р., Будака В.Д.; Вайнштока В.А., Гузя О.М., Іваницького Я.Л., Іосілевича Г.Б., Камінського А.О., Кіта Г.С., Кир'яна В.І., Кривеня В.А., Кушніра Р.М., Когаєва В.П., Леонова М.Я., Лобанова Л.М., Марущака П.О., Махненка В.І., Махутова М.А., Морозова Є.М., Ориняка І.В., Осадчука В.А., Панасюка В.В., Партоні В.З., Підстригача Я.С., Работнова Ю.М., Саврука М.П., Сілованюка В.П., Сулима Г.Т., Трощенко В.Т., Труфякова В.І., Улітка А.Ф., Хоббакера А.Ф., Чаусова М.Г., Черепанова Г.П., Шваб'юка В.І., Яреми С.Я., Яснія П.В., Меддокса С. Дж., Erdogan F., Griffith F., Irwin G., Westergard H., Wnuk M.

Дослідженню механічних проблем неметалів присвячені роботи Албаута Г.М., Амеляновича К.К., Бартенєва Г.М., Васильченка І.П., Гудімова М.М., Марголіна А.М., Підгурського М.І., Пуха В.П., Еванса О.Г., Freiman S.W.

Оптичні методи експериментальної механіки займають особливе місце, завдяки своїм широким можливостям та інформативності одержаних результатів. Серед оптичних методів одним з найбільш дієвих є поляризаційно-оптичний (фотопружність). Значний внесок у розвиток фотопружності, її різних модифікацій та застосувань внесли : Абен Х.К., Александров А.Я., Ахметзянов М.Х., Бугаков І.І., Будака В.Д., Вардана Г.С., Грілицький Д.В., Жилкін В.А., Касаткін Б.С., Кепич Т.Ю., Книш В.В., Костандов Ю.А., Лобанов Л.М., Мазур К.І., Малежик М.П., Марінченко В.М., Мильніков О.В., Наконечний В.В., Нетребко В.П., Нуркіянов А.М., Пригоровський М.І.,

Радченко М.М., Савченко В.І., Січко В.М., Табанюхова М.В., Твердоступ Р.Б., Тараторін Б.І., Тихомиров В.М., Хесін Г.Л., Чешун Л.М., Удалов Є.П., Шарафутдінов Г.З., Шокотько С.Г., Дюреллі А., Heeker F.W., Zhengmei L.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, відзначено, що можливості існуючих аналітичних, чисельних та експериментальних методів механіки є обмеженими, не завжди дозволяють оцінити НДС та граничний стан елементів машин та конструкцій, виготовлених з діелектриків. На підставі цього сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** викладено дані про апаратуру, за допомогою якої проводились експериментальні дослідження: координатно-синхронні поляриметри КСП-7, КСП-10, агрегатні поляризаційні мікроскопи ПОЛАМ Р-312 та ПОЛАМ Л-211. Фотопружні вимірювання оптичної анізотропії у тонкостінних об'єктах з епоксидної смоли проводили за допомогою координатно-синхронного поляриметра КСП-10. Кінетику руйнування силікатного неорганічного скла досліджували за допомогою агрегатних поляризаційних мікроскопів ПОЛАМ Р-312 та ПОЛАМ Л-211, для яких сконструйовано спеціальні пристрої, які кріпились на предметному столику мікроскопів. За допомогою цих пристроїв реалізовано навантаження розтягу та триточкового згину. Спеціальні термокамери застосовано для дослідження склозразків за різних температур і вологості. Вони дозволяли оцінити термонапружений стан триплексів при температурах охолодження до $T=213\text{K}$. Оптичну анізотропію у гомогенних та гетерогенних триплексах вимірювали за допомогою координатно-синхронного поляриметра КСП-7.

При розробці нових оптичних експериментально-розрахункових методів (поглинання та дифузного поверхневого розсіювання) для створення лабораторної установки була використана наступна апаратура: стабілізований регульований блок живлення «АГАТ», прес У-7, стабілізований вимірювач оптичного випромінювання «Кварц-1». При вимірюваннях лінійних розмірів застосовували катетометр КМ-8. Тестовий експеримент з вимірювання поглинання поляризованого у різних площинах світла, яке проходило крізь «заморожений» під стискаючим навантаженням диск з епоксидної смоли ЕД-20М проводили за допомогою концентраційного фотоелектроколориметра КФК-2.

Крім того, у розділі наводяться дані дослідження оптико-механічних характеристик полімерних матеріалів на базі епоксидної смоли одностадійного тверднення ЕД-20М та епоксидної смоли двостадійного тверднення ЕПСА, органічного скла Е-2 та органічного скла СО, рівномірно забарвленого по товщині пластини. Також аналізуються фізико-механічні характеристики неорганічного силікатного скла.

Наведено дані про методи експериментального створення тріщиноподібних дефектів у епоксидних смолах ЕД-20М, ЕПСА, органічному та неорганічному склі. При створенні дефектів типу тріщин в матеріалах на базі епоксидної смоли одностадійного тверднення, виготовляли спеціальний пробивник та експериментально підбирали режими температур пробивника та епоксидної смоли. Для матеріалу двостадійного тверднення задача створення

тріщиноподібного дефекту спрощується, тріщина створюється у недополімеризованому матеріалі. Створення тріщин у склозразках має свої особливості і реалізовувалось за допомогою пристрою для триточкового згину.

Крім того, у розділі проаналізовано існуючі теорії міцності, за допомогою літературних джерел показано області їх застосування для різних видів напруженого стану та різних матеріалів. Зроблено висновок, що фізична складова у граничних станах полімерів має більш виражений характер, ніж для металів.

У третьому розділі розроблено новий експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища (рис. 1)

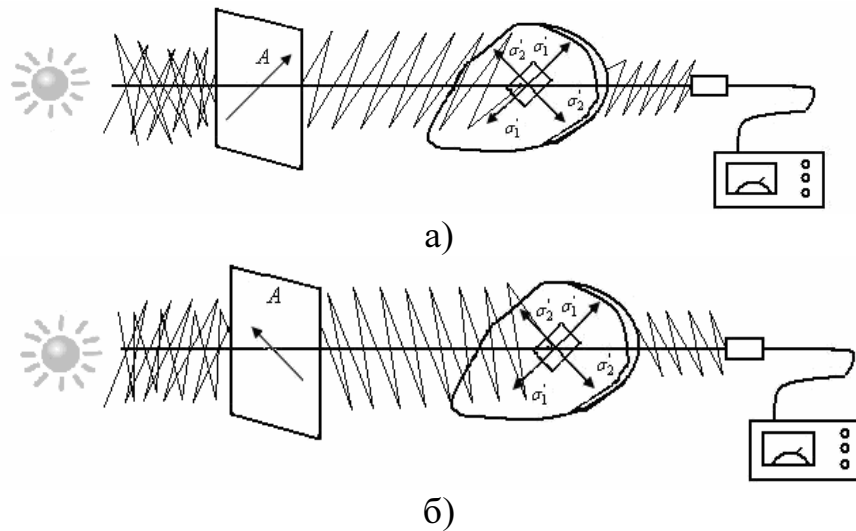


Рис. 1. Схема вимірювання НДС об'єктів методом, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища: а) визначення головного напруження σ_1 б) визначення головного напруження σ_2 .

Рівняння Неймана дозволяють пов'язати 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), одержуємо :

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

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

Після ряду перетворень одержимо :

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

З рівності (3) впливають 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 :

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

де I^* - інтенсивність світла на вході в середовище; I - інтенсивність світла на виході з середовища; λ - довжина хвилі зонduючого випромінювання; ζ – натуральний показник поглинання.

Сумісне рішення рівнянь (5) і (6), після ряду перетворень приводить до системи рівнянь (7) для визначення головних деформацій ε_1 , ε_2 , ε_3 :

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

У розділі також описано застосування методу поглинання для визначення НДС об'єктів для матеріалів яких коефіцієнт Пуассона $\nu=0,5$; розглядається випадок узагальненого плоского напруженого стану ($\sigma_3=0$, $\nu \neq 0,5$); великих деформацій (1-5%). Крім того, аналізуються варіанти, коли зонduюче випромінювання є поляризованим і неполяризованим.

Метод поглинання застосовано для визначення величин КІН, з використанням у якості зонduючого як поляризованого, так і неполяризованого світла. Для величин КІН K_I , K_{II} одержано формули :

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi} [M_1^{**} \ln(I_0/I_1) + M_2^{**} \ln(I_0/I_2)]}{4\pi d f^*} \quad (8)$$

$$K_{II} = \frac{\sqrt{2\pi} [M_3^{**} \ln(I_0/I_1) + M_4^{**} \ln(I_0/I_2)]}{4\pi d f^*} \quad (9)$$

Додаткові можливості для визначення КІН K_I і K_{II} надає комплексний метод, який використовує як дані фотопружних вимірювань, так і п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища.

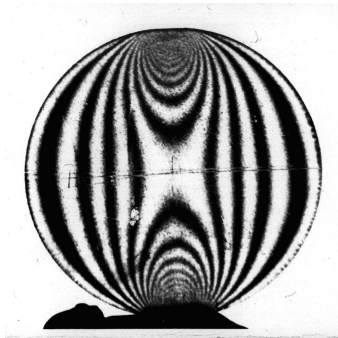


Рис. 2. Картина ізохроматичних смуг у “замороженому” під стискаючим навантаженням диску ($\sigma_1=0,05$ МПа, $\sigma_2=-0,15$ МПа)

Метод поглинання підтверджено на рівні тестового експерименту з визначення НДС для стиснутого вздовж осі диска з епоксидної смоли ЕД-20М. На рис. 2 показано відповідну картину ізохроматичних смуг. Результати порівняння експериментальних та розрахункових даних визначення величин напружень і деформацій для різних площин поляризації для двох довжин хвиль зонduючого випромінювання ($\lambda_1=590$ нм, $\lambda_2=620$ нм) наведено на рис. 3,4.

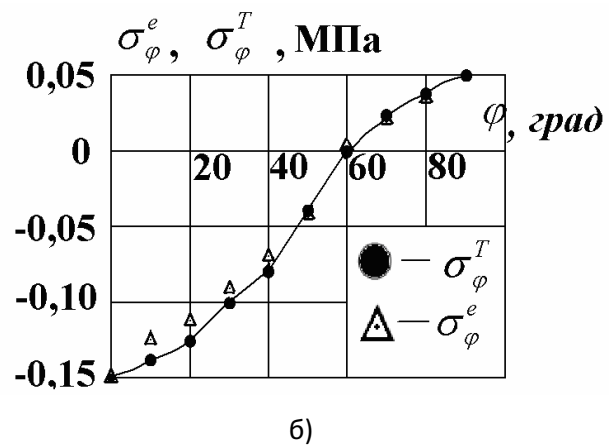
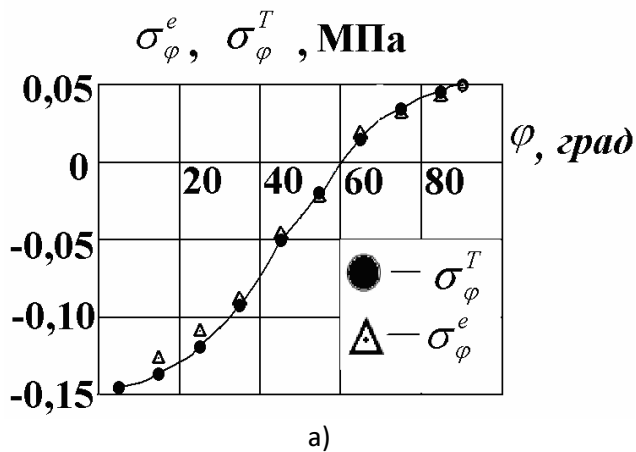


Рис. 3. Теоретично розраховані σ_φ^T та експериментально визначені величини напружень σ_φ^e за даними поглинання інтенсивності світла для двох довжин хвиль: а) $\lambda = 590$ нм, б) $\lambda = 620$ нм

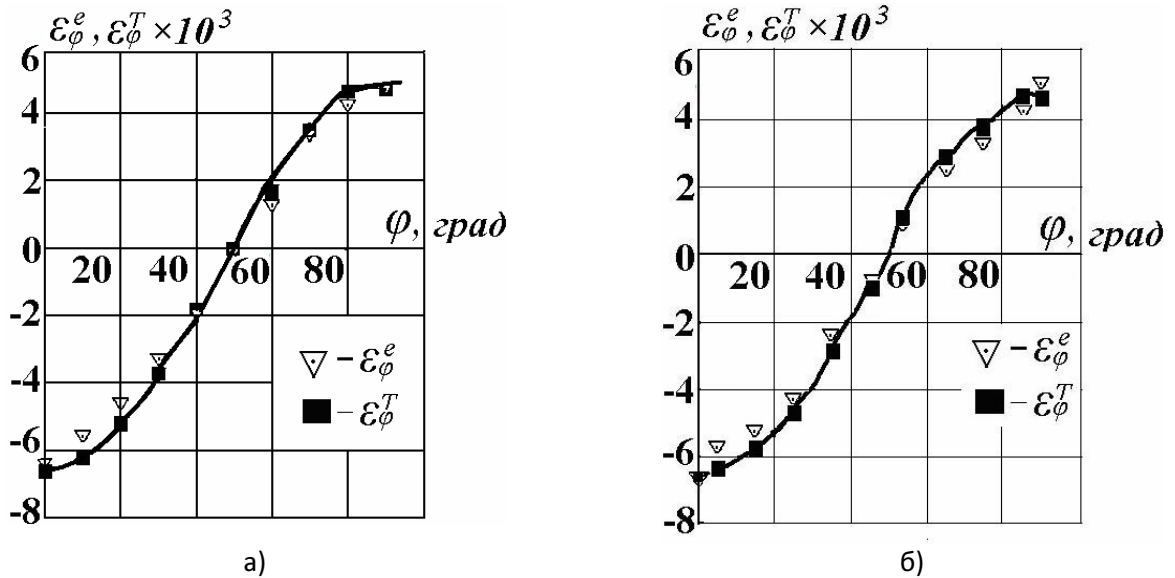
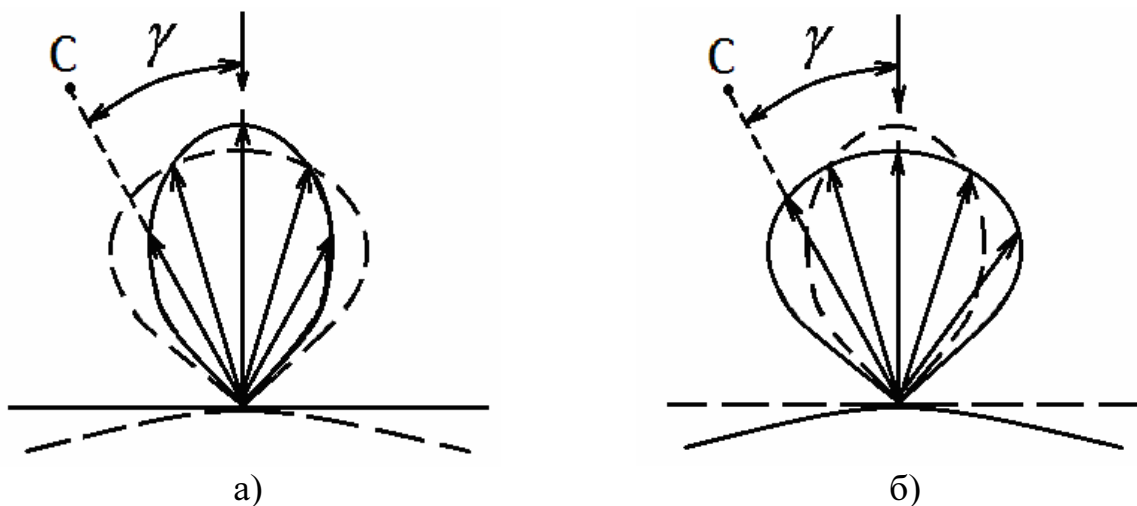


Рис. 4. Теоретично розраховані $\varepsilon_{\phi}^{\circ}$ та експериментально визначені величини деформацій ε_{ϕ}^e за даними поглинання інтенсивності світла:

а) $\lambda = 590 \text{ нм}$, б) $\lambda = 620 \text{ нм}$.

Відмінність експериментально визначених даних від розрахованих теоретично, в основному, складала: для напружень – 5-8%, для деформацій – 11%.

У четвертому розділі розроблено новий експериментально-розрахунковий метод визначення НДС, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання (МДПР). Принципову схему методу подано на рис.5.



— - положення поверхні до деформування об'єкта,
 - - - - - положення після деформування об'єкта.

Рис. 5. Зміна інтенсивності дифузної складової світлового потоку, відбитого від дифузнорозсіюючої поверхні при зміні її кривизни

а) збільшення інтенсивності при збільшенні кривизни;

б) зменшення інтенсивності при зменшенні кривизни

Для світлового потоку, відбитого від дифузнорозсіюючої поверхні об'єкта при його 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.5а);
- при зменшенні кривизни поверхні інтенсивність дзеркальної складової зростає, а дифузної - зменшується (рис.5б).

Математично МДПР може бути описаний для лінійного об'єкта формулою:

$$\Delta k(x) = f\left(\frac{\Delta I}{I_0}\right), \quad (10)$$

де ΔI - зміна інтенсивності світла після деформування об'єкта.

Для двовимірного, системою рівнянь :

$$\begin{cases} \Delta M_x = D \left[\psi_1 \left(\frac{\Delta I_x}{I_{ox}} \right) + \mu \psi_2 \left(\frac{\Delta I_y}{I_{oy}} \right) \right] \\ \Delta M_y = D \left[\psi_2 \left(\frac{\Delta I_y}{I_{oy}} \right) + \mu \psi_1 \left(\frac{\Delta I_x}{I_{ox}} \right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

Розглянемо застосування у якості зондуючого неполяризованого випромінювання:

$$(\Delta M_x + \Delta M_y) = D(1 - \nu) \psi \frac{\Delta I}{I_0} \quad (12)$$

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

Значний практичний інтерес може становити розробка оптичних тензодатчиків, які працюють на основі МДПР (рис. 6) :

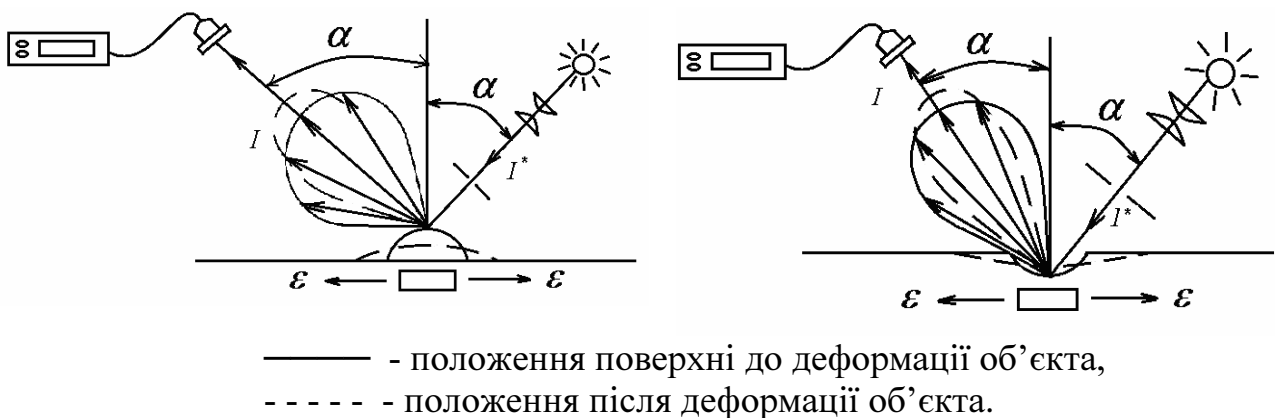


Рис. 6. Вимірювання дзеркальної складової дифузновідбитого світлового потоку. Оптичний тензодатчик на основі ефекту МДПР, розтяг, $I > I_0$

а) чутливий елемент датчика – вигнута пластинка;

б) чутливий елемент датчика – виїмка на поверхні об'єкта

Метод підтверджено на рівні тестових експериментів. Результати експериментально визначених та теоретично розрахованих деформацій поверхні

для двох схем проведення експерименту (вимірювання інтенсивностей дзеркальної складової відбитого світлового потоку – схема 1 та дифузної складової – схема 2) наведено на рис. 9, 10. Аналізуючи графіки, можна зробити висновок про достатньо точне співпадання експериментальних та розрахункових даних (середні похибки склали 3,03% для схеми 1 та 3,14% для схеми 2).

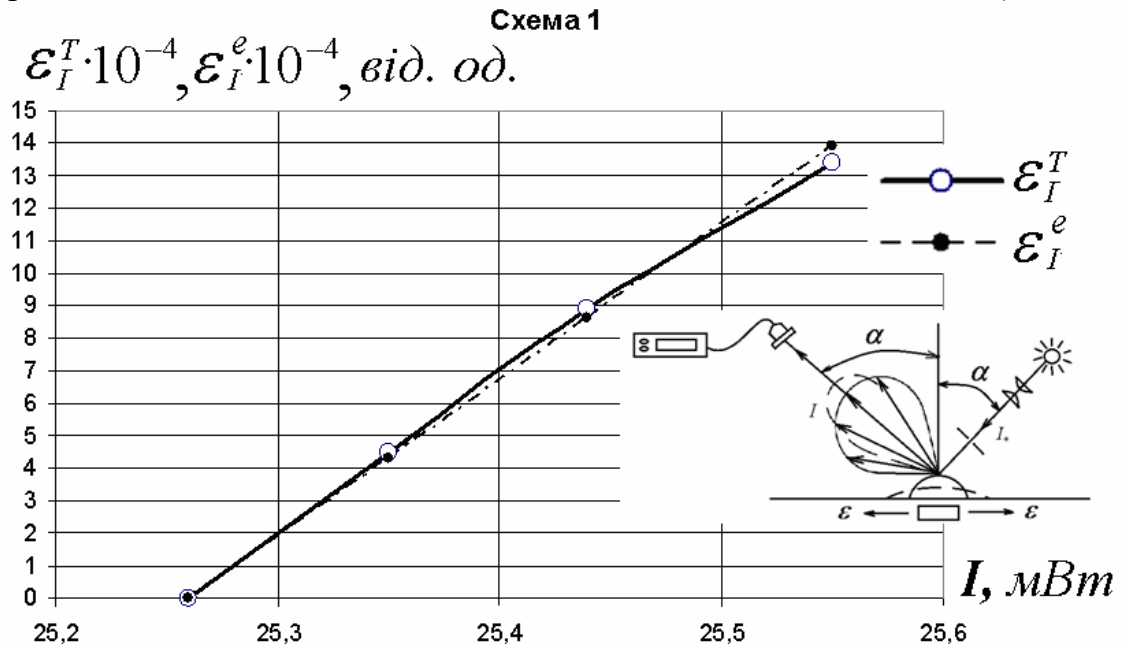


Рис.7. Схема 1 (вимірюється інтенсивність дзеркальної складової світлового потоку ($\alpha=30^\circ$) дифузного відбитого від поверхні вигнутої пластинки датчика)

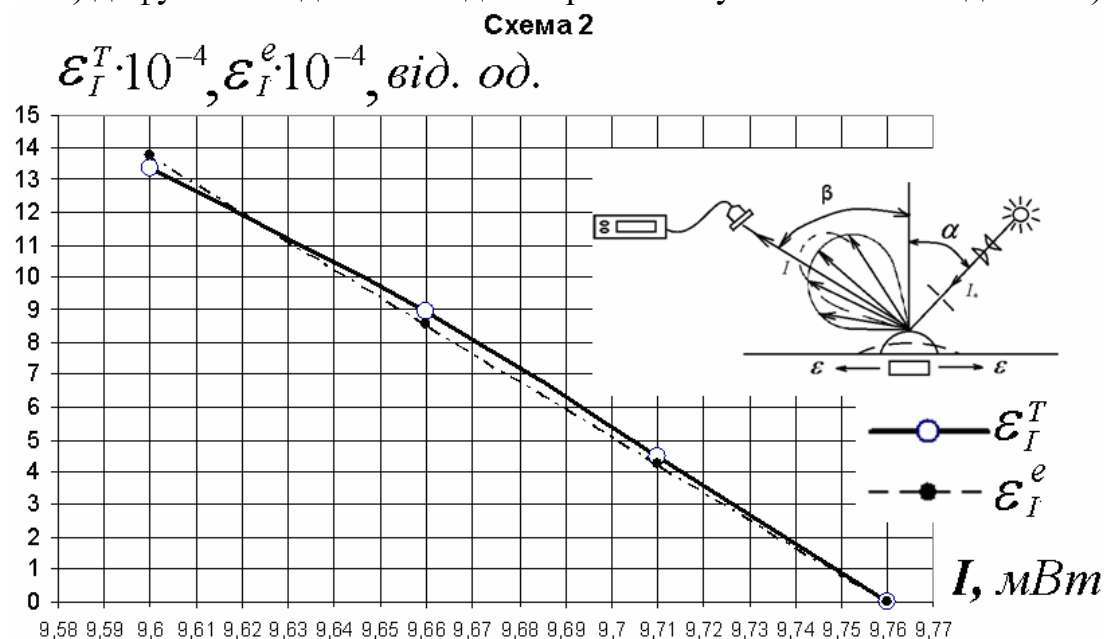


Рис. 8. Схема 2 (вимірюється інтенсивність дифузної складової світлового потоку ($\beta=45^\circ$) відбитого від поверхні вигнутої пластинки датчика)

У п'ятому розділі наведено дані по розробці фізико-механічного критерію граничного стану діелектриків (критерію тензора діелектричної проникності – ТДП). При цьому перетворюють рівняння Максвелла до виду наступної системи рівнянь.

$$\begin{cases} \frac{\Delta\chi_1}{C_2} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_1 + (\sigma_2 + \sigma_3) \\ \frac{\Delta\chi_2}{C_2} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_2 + (\sigma_1 + \sigma_3), \\ \frac{\Delta\chi_3}{C_2} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (13)$$

Після введення позначень :

$$\begin{cases} \frac{\Delta\chi_1}{C_2} = \sigma_{*1} \\ \frac{\Delta\chi_2}{C_2} = \sigma_{*2}, \\ \frac{\Delta\chi_3}{C_2} = \sigma_{*3} \end{cases} \quad (14)$$

Одержують систему рівнянь :

$$\begin{cases} \sigma_{*1} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ \sigma_{*2} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_2 + \sigma_1 + \sigma_3, \\ \sigma_{*3} = \frac{C_1}{C_2}\sigma_3 + \sigma_1 + \sigma_2 \end{cases} \quad (15)$$

Запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків (критерій ТДП), який, для випадку, коли $\sigma_{*1} > \sigma_{*2} > \sigma_{*3}$, описується першим з рівнянь системи (15). При цьому більше з σ_{*i} ($i=1,2,3$) є межею міцності, а вираз для еквівалентного напруження набуде вигляду:

$$\sigma_{\bar{a}\bar{e}\bar{a}} = \frac{\tilde{N}_1}{\tilde{N}_2} \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (16)$$

(у випадку, коли $\sigma_{*1} > \sigma_{*2} > \sigma_{*3}$).

Розглянуто варіант граничного стану полімеру за короткочасного та довготривалого навантажень (рис. 9, 10):

$$\begin{cases} 2\Delta\chi_1 = C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{E}[C_1^*\varepsilon_1 + C_2^*(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] \\ 2\Delta\chi_2 = C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{E}[C_1^*\varepsilon_2 + C_2^*(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)], \\ 2\Delta\chi_3 = C_1\sigma_3 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E}[C_1^*\varepsilon_3 + C_2^*(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] \end{cases} \quad (17)$$

де C_1^* , C_2^* - приведені оптико-механічні константи деформацій до напружень.

Підкреслено, що запропонований критерій ТДП ефективний для практичного застосування саме для короткочасного навантаження полімерів (критерій описано формулою (16)), оскільки, виникаючи при довготривалому навантаженні процеси ускладнюють визначення констант, які входять у систему рівнянь (17).

На рис. 9 подано характерні картини ізохроматичних смуг у розтягнутій пластині з епоксидної смоли ЕПСА з наскрізною тріщиною, нормальною до напрямку розтягуючих зусиль за короткочасного та довготривалого навантажень.



Рис. 9. Картини ізохроматичних смуг для розтягнутої пластини із наскрізною тріщиною, нормальною до напрямку розтягу

а) короткочасне навантаження (σ_k, ε_k): $\sigma_0=4,7$ МПа, $t=1$ хв;

б) довготривале навантаження ($\sigma_d = \sigma_k, \varepsilon_d \gg \varepsilon_k$): $\sigma_0=4,7$ МПа, $t=60$ хв

У розділі наведено дані щодо визначення абсолютних оптико-механічних констант C_1 та C_2 і їх співвідношення C_1/C_2 , за даними фотопружних вимірювань. Показано, що з найбільшою точністю визначається величина співвідношення C_1/C_2 :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta'_1 - \delta_1}{\delta'_2 - \delta_2} \quad (18)$$

де δ_1, δ_2 - оптичні різниці ходу променів, які відповідають поляризація вздовж першого та другого головних напрямків, відповідно.

У формулу (18) входять тільки чотири величини, які є, за фізичним змістом, одним параметром (різницею оптичного ходу променів δ).

У розділі обґрунтовано граничний стан в околі тріщини на базі фізико-механічного критерію ТДП.

В результаті підходів критерію ТДП, з врахуванням особливості розподілу напружень в області дії пружної асимптотики, одержано рівняння:

$$\sigma_*^0 = \frac{AK_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(B + D \frac{K_{II}}{K_I} \right) \quad (19)$$

$$\sigma_*^0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (A^* K_I + B^* K_{II}) \quad (20)$$

Результати експериментів по руйнуванню оболонок із епоксидної смоли ЕД-20М з тріщинами, розміщеними вздовж формоутворюючих (рис. 11), наведено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Дані руйнування оболонок з епоксидної смоли ЕД-20М з тріщинами,
розміщеними вздовж формоутворюючої

№ п/п	$l \cdot 10^{-3}$ м	Θ_1 град.	Θ_2 град.	λ	K_I КПа $\cdot$ м $^{1/2}$	K_{II} КПа $\cdot$ м $^{1/2}$
1	15	35	41	- 0,45	19,6	- 8,9
2	8	23	30	- 0,28	28,1	- 7,8

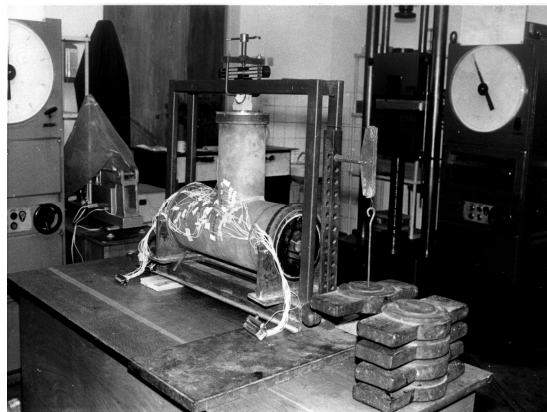


Рис. 10. Експериментальна установка для навантаження оболонкових конструкцій

У шостому розділі модифіковано поляризаційно-оптичний метод для визначення величин КІН K_I , K_{II} , K_{III} для неоднорідного основного напруженого стану та малих (до 1λ) і великих ($> 8\lambda$) картин оптичної анізотропії та значних градієнтів, коли важко визначити нульову ізохрому.

Компоненти додаткового напруженого стану σ_{ij} зв'язані з компонентами загального напруженого стану σ'_{ij} і компонентами основного напруженого стану σ_{ij}^0 залежністю :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \sigma_{ij}^0. \quad (21)$$

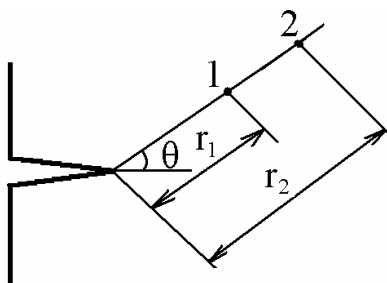


Рис. 11. Схема вимірювання параметрів оптичної анізотропії в т.1,2 у зоні дії пружної асимптотики Ірвіна-Вестергаарда

Проводячи оцінювання оптичної анізотропії в двох точках 1 і 2, які знаходяться в області дії пружної асимптотики Ірвіна-Вестергаарда (рис.11), та враховуючи, що градієнт параметрів основного напруженого стану є значно меншим 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, одержимо вирази для

визначення КІН K_I і K_{II} :

$$K_I = \frac{A_1(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_2 \cos 2\varphi_2) + B_1(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (22)$$

$$K_{II} = \frac{A_2(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_2 \cos 2\varphi_2) + B_2(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (23)$$

У формулах (22), (23) A_1, B_1, A_2, B_2 – вирази, величини яких залежать від кута Θ наближення до вершини тріщини.

δ_1, δ_2 – оптичні різниці ходу, виміряні в точках 1, 2; φ_1, φ_2 – параметри ізокліни в точках 1, 2; r_1, r_2 – радіус-вектори точок 1, 2.

Якщо проводити фотопружні вимірювання при $\theta = \frac{\pi}{2}$, формули (22) і (23) приймуть вигляд :

$$K_I = \frac{\sqrt{r_1}}{Cd} \{A_1(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_0 \cos 2\varphi_0) + B_1(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_0 \sin 2\varphi_0)\} \quad (24)$$

$$K_{II} = \frac{\sqrt{r_1}}{Cd} \{A_2(\delta_1 \cos 2\varphi_1 - \delta_0 \cos 2\varphi_0) + B_2(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_0 \sin 2\varphi_0)\} \quad (25)$$

Визначення КІН K_{III} для довільного випадку НДС поблизу берегів тріщини (при наявності всіх трьох КІН : K_I, K_{II}, K_{III}) можливе при косому просвічуванні (рис. 12) та на субзрізах (рис. 13).

Використовуючи дані фотопружних вимірювань у т. 1, 2 при косому просвічуванні (рис. 12) одержуємо для визначення K_{III} вираз:

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

$$- \frac{1}{2} \left\{ K_I \operatorname{ctg} \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\nu - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right) - K_{II} \left(2 - 2\nu + \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \right) \right\} \operatorname{tg} 2\alpha \quad (26)$$

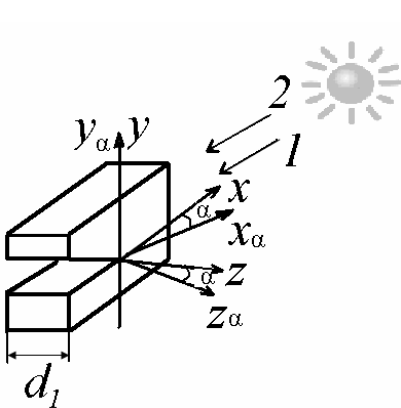


Рис. 12. Схема визначення КІН K_{III} при косому просвічуванні.

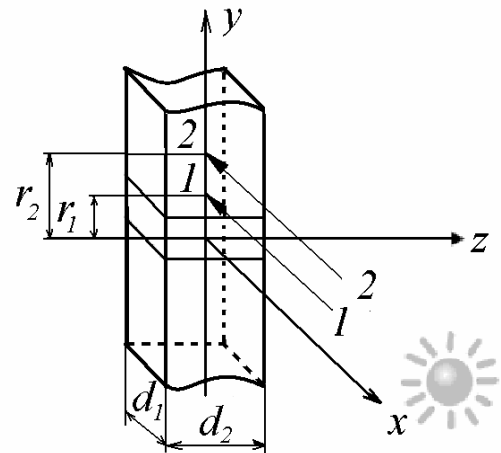


Рис. 13. Субзріз для визначення величин КІН K_{III}

При дослідженні на субзізах (рис. 13) $\alpha=0$. Тоді для визначення K_{III} одержимо вираз :

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd_1 (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2}) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad (27)$$

При $\theta = \frac{\pi}{2}$, формула (27) прийме вигляд:

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\pi}{Cd_1}} \frac{(\delta_1 \sin 2\varphi_1 - \delta_2 \sin 2\varphi_2)}{(1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad ((28)$$

Для випадку великих різниць оптичного ходу ($> 8\lambda$) та значних градієнтів вимірювання оптичної анізотропії ведуть, використовуючи дві монохроматичні хвилі довжинами λ_1, λ_2 , або чотири хвилі довжинами: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$

У першому випадку для визначення КІН K_I, K_{II}, K_{III} одержано формули:

$$K_I = - \frac{\sqrt{\pi} \lambda_1 \lambda_2 [k_1 (\sin 2\varphi_1 + \cos 2\varphi_1) + k_2 (\sin 2\varphi_2 + \cos 2\varphi_2)]}{Cd (\lambda_1 - \lambda_2) (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (29)$$

$$K_{II} = - \frac{\sqrt{\pi} \lambda_1 \lambda_2 [k_1 (\sin 2\varphi_1 - \cos 2\varphi_1) + k_2 (\sin 2\varphi_2 - \cos 2\varphi_2)]}{Cd (\lambda_1 - \lambda_2) (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (30)$$

$$K_{III} = - \frac{\sqrt{\pi} \lambda_1 \lambda_2 (k_1 \sin 2\varphi_1 - k_2 \sin 2\varphi_2)}{Cd_1 (\lambda_1 - \lambda_2) (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (31)$$

У другому випадку КІН K_I, K_{II}, K_{III} визначаємо за формулами:

$$K_I = - \frac{\sqrt{\pi} \left[\frac{k_1 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} (\sin 2\varphi_1 + \cos 2\varphi_1) + \frac{k_2^* \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_4)} (\sin 2\varphi_2 + \cos 2\varphi_2) \right]}{Cd (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (32)$$

$$K_{II} = - \frac{\sqrt{\pi} \left[- \frac{k_1 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} (\sin 2\varphi_1 - \cos 2\varphi_1) + \frac{k_2^* \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_4)} (\sin 2\varphi_2) \right]}{Cd (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (33)$$

$$K_{III} = - \frac{\sqrt{\pi} \left(\frac{k_1 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \sin 2\varphi_1 - \frac{k_2^* \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_4)} \sin 2\varphi_2 \right)}{Cd_1 (1/\sqrt{r_1} - 1/\sqrt{r_2})} \quad (34)$$

Результати тестових експериментів для склопластинок з крайовими тріщинами при розтягу та триточковому згині показані на рис. 14.

Аналізуючи графіки на рис. 14, бачимо, що при $0,4 \leq r_1 \leq 0,8$ розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 3%.

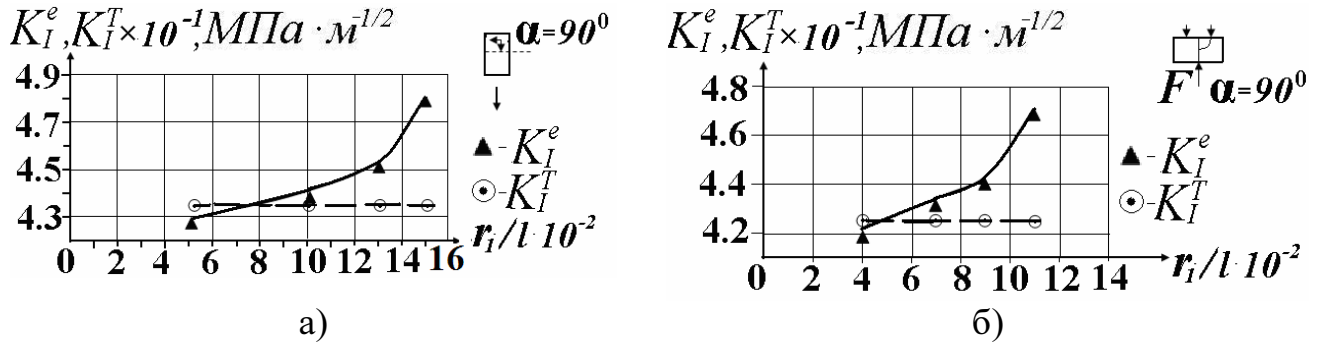


Рис. 14. Експериментальні та розрахункові величини КІН K_I : а) розтяг пластини з крайовою тріщиною, $\alpha = 90^\circ$; б) триточковий згин пластини з крайовою тріщиною, $\alpha = 90^\circ$.

У цьому розділі наведено дані комплексного дослідження багатошарових структур (триплексів). Питома вага багатошарових конструкцій при створенні нових сучасних машин суттєво зростає. Завдяки своїй структурі вони здатні витримувати значні навантаження та зміну механіко-фізичних факторів (механічних характеристик внаслідок зміни температури, вологості, радіації). Аналітичні та чисельно-аналітичні методи не завжди дозволяють одержати рішення задач по визначенню їх НДС з врахуванням всього комплексу існуючих чинників. Складовими частинами (елементами) таких багатошарових структур, як триплекси, є прозорі діелектричні конструкційні матеріали (неорганічне силікатне скло, органічне силікатне скло, епоксидна смола). Для визначення НДС та граничного стану таких об'єктів, за наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових елементах, у цьому розділі застосовано методику поляризаційно-оптичного методу (розділ 6) та фізико-механічний критерій граничного стану ТДП (розділ 5).

Основні закономірності кінетики руйнування неорганічного силікатного скла, як одного з базових матеріалів гомогенних та гетерогенних триплексів подано на рис. 15.

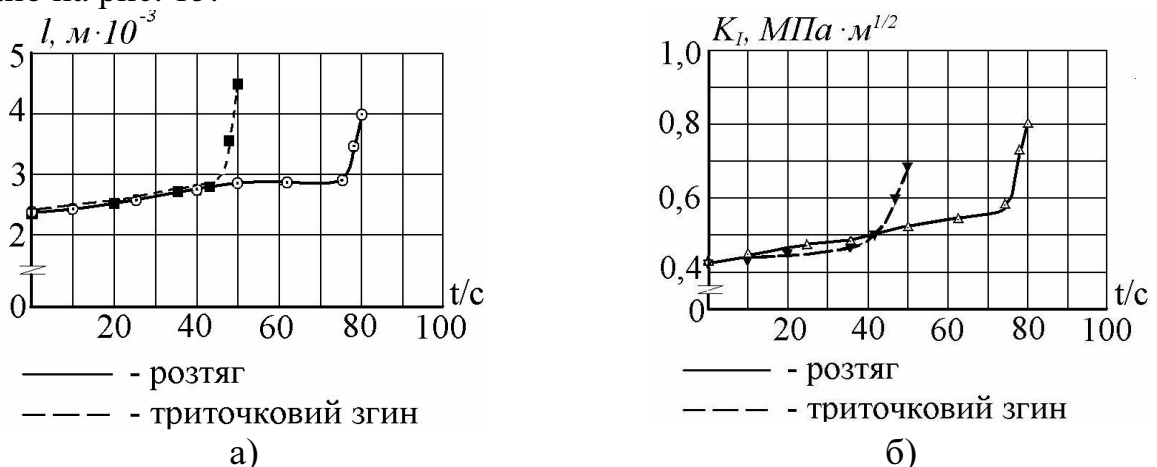


Рис. 15. Кінетика руйнування неорганічного силікатного скла при розтязі та триточковому згині: а) зміна довжини крайової тріщини; б) зміна величини КІН K_I для крайової тріщини.

Графіки залежностей $K_I(t)$, $l(t)$ мають схожий вигляд, відповідно до виду навантаження. Помітно дві ділянки (повільного та швидкого поширення

тріщини), подібні тривалості, та нахили кривих (рівність відповідних величин $K_I^p = K_I^{CA}$ на ділянках). Для розтягу зона повільного проростання тріщини знаходиться в межах $K_I^p = 0,45 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} - 0,60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, для триточкового згину - $K_I^{CA} = 0,41 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} - 0,52 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Відповідно, зона швидкого поширення тріщини при розтягу $0,60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} - 0,83 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, для триточкового згину $0,50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} - 0,72 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Графіки залежностей еквівалентних КІН, розраховані для неорганічного силікатного скла за відомою у літературі методикою та, згідно критерію ТДП, наведено на рис. 16. Для середньої величини параметру $A=0,806$, криві на рис.16 будуть, практично, накладатися, що доводить можливість застосування критерію ТДП для визначення граничного стану неорганічного силікатного скла. Картина оптичної анізотропії в околі вершини тріщини, наведена на рис.17, характеризується малою величиною, що робить неможливим коректне застосування методу смуг, і потребує аналізу за допомогою модифікованого поляризаційно-оптичного метода.

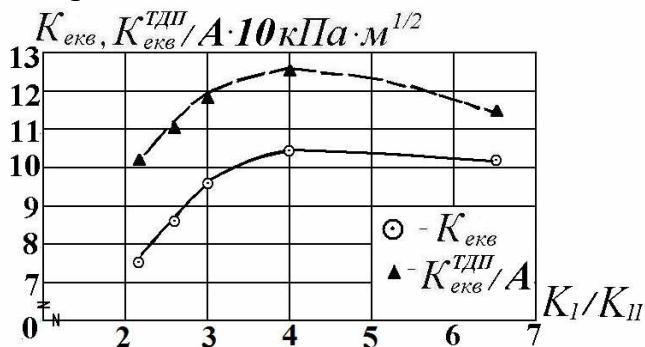


Рис. 16. Залежність еквівалентних КІН $K_{екв}$ та $K_{екв}^{TDP}/A^*$ від величин співвідношення КІН K_I/K_{II} .

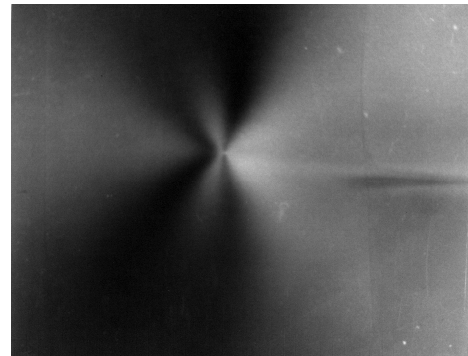


Рис. 17. Оптична анізотропія в околі вершини тріщин у пластині з електровакуумного неорганічного силікатного скла $K_I=0,40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Проаналізовано дані руйнування органічного скла, як матеріалу, який входить у склад гетерогенних триплексів. При цьому фіксувалися величини руйнуючого навантаження F та кута поширення тріщини θ для пластин з оргскла з крайовими тріщинами, які утворювали кути α з напрямком розтягуючи зусиль. На рис. 18, 19 показано графіки залежностей $F(K_I/K_{II})$ та $\theta(\alpha)$.

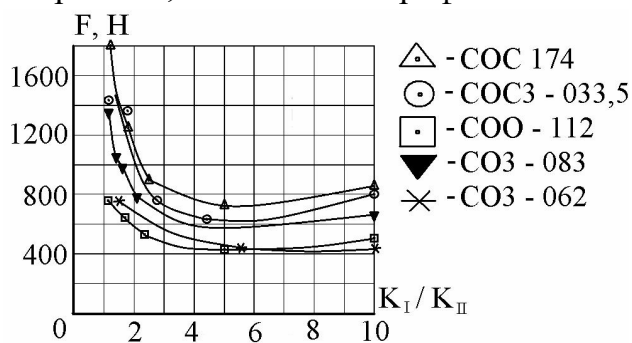


Рис. 18. Залежність руйнуючих зусиль F від величини співвідношення КІН K_I/K_{II}

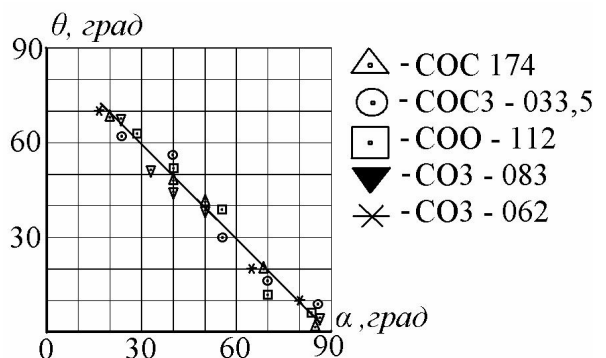


Рис. 19. Залежність кута поширення тріщини θ від кута орієнтації прорізи α відносно краю пластини.

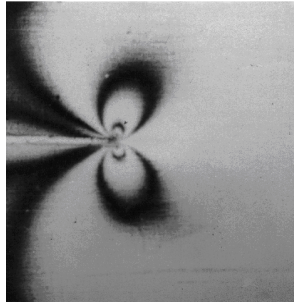


Рис. 20. Зображення ізохроматичних смуг для крайової тріщини, нормальної до розтягуючих зусиль у пластині.

На рис. 20 показано картину ізохроматичних смуг для крайової тріщини у пластині з органічного скла Е-2, яке має високу оптичну чутливість. Аналіз графіків на рис.18 дозволяє зробити висновок про однаковий закономірний характер руйнування різних видів органічного скла. В діапазоні співвідношення величин $K_I/K_{II}=1,2 - 2,5$, еквівалентний КІН зростає, і при $K_I / K_{II} > 2,5$ переходить у «полку». Оскільки, внаслідок

менших значень $K_{екв}$ в діапазоні $K_I / K_{II} = 1,2 - 2,5$ величина додаткового НДС і концентрація напружень менша, відповідні сили, необхідні для руйнування зразків, більші, ніж у діапазоні співвідношення $K_I / K_{II} > 2,5$. Величина кута поширення тріщини θ для всіх зразків приблизно визначається за формулою $\theta = 90 - \alpha$ що відповідає даним літератури (рис. 19).

З метою оцінки комплексного впливу обрамлення (конструкційного та технологічного) на величини КІН для тріщиноподібних дефектів у склеюючому шарі, було проведено три серії експериментів по визначенню величин КІН для поверхневих тріщин різної відносної глибини та наскрізних тріщин аналогічної орієнтації у епоксидній смолі. При цьому аналізувався конструкційний вплив (локальне збільшення жорсткості) обрамлення, вплив поля залишкових напружень на величини КІН K_I , K_{II} , K_{III} та еквівалентний КІН $K_{екв}$.

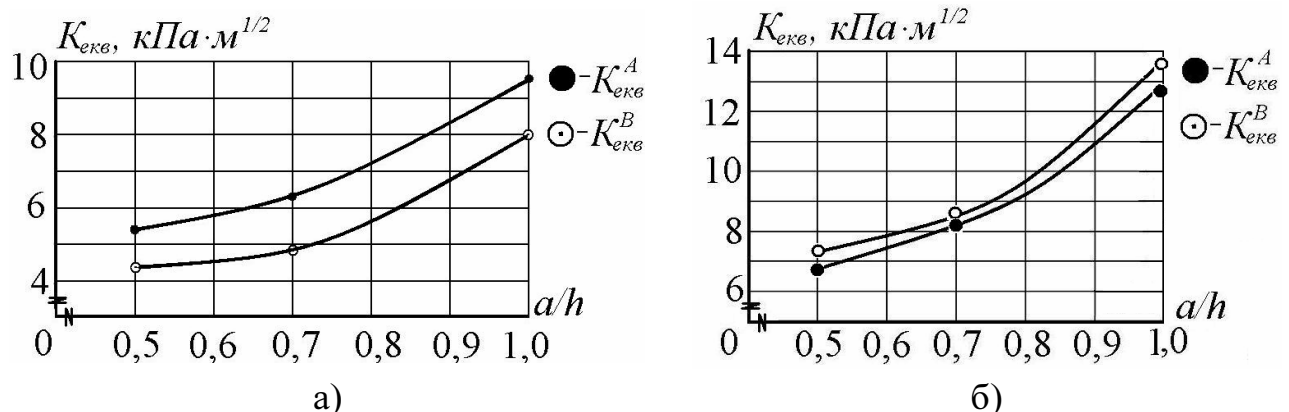


Рис.21 Еквівалентний КІН $K_{екв}$ для тріщин, які знаходяться в зоні впливу обрамлення: а) конструкційний вплив обрамлення; б) комплексний вплив обрамлення

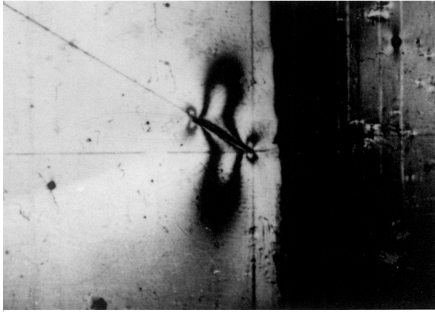


Рис. 22. Картина смуг для наскрізної тріщини, яка знаходиться поблизу обрамлення

На рис. 22 наведено картину ізохроматичних смуг для наскрізної тріщини у пластині з епоксидної смоли ЕПСА, яка знаходиться біля обрамлення.

Порівняння графіків на рис. 21 дозволяє зробити висновок, що поле залишкових напружень, за рахунок свого чітко вираженого градієнтного характеру суттєво збільшило відповідні величини для найближчої до обрамлення точки фронту тріщини - $K_{\bar{a}\bar{e}\bar{a}}^A$. Зростання $K_{\bar{a}\bar{e}\bar{a}}^A$ склало: для $(a/h)_1=0,5$ - 67,05%; для $(a/h)_2=0,7$ - на 69,3%, для $(a/h)_3=1$ - 71,7%. Відповідні величини для вершини В були: для $(a/h)_1=0,5$ - 30,0%; для $(a/h)_2=0,7$ - 30,8%, для $(a/h)_3=1$ - 36,3%. При цьому як для поверхневих тріщин, так і для наскрізної, комплексний КІН для ближньої вершини А почав, хоч і на невелику величину, переважати аналогічне значення для віддаленої вершини В. Так, для $(a/h)_1=0,5$ $K_{\bar{a}\bar{e}\bar{a}}^A$ більше $K_{\bar{a}\bar{e}\bar{a}}^B$ на 4,6%, для $(a/h)_2=0,7$ на 2,2%, для наскрізної тріщини $(a/h)_3=1$ на 5,4%. Тому, у випадку комплексного впливу обрамлення, руйнування почнеться з області фронту тріщини, яка ближче до обрамлення, причому на поширення наскрізної тріщини суттєвий вплив будуть мати як деформація нормального відриву (КІН K_I) так і поперечний зсув (КІН K_{II}).

За допомогою модифікованого поляризаційно-оптичного методу (розділ 6) та розробленого фізико-механічного критерію ТДП граничного стану діелектриків (розділ 5), проведено дослідження гомогенних та гетерогенних триплексів, з обрамленням та без нього. Результати визначення напруженого стану чотирьох конструктивних варіантів триплексів при температурі $T=213$ К, а також розподілу еквівалентних напружень, розрахованих згідно фізико-механічного критерію ТДП, наведено у вигляді графіків на рис. 23-26.

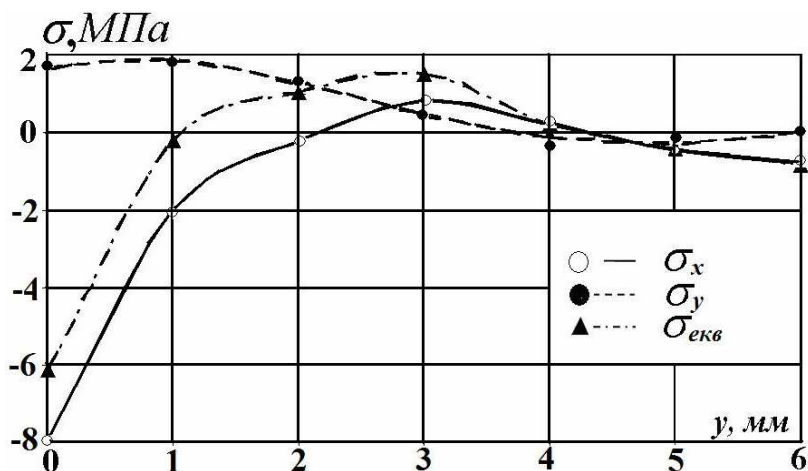


Рис. 23. Розподіл напружень σ_x , σ_y , $\sigma_{екв}$ у гомогенному триплексі без обрамлення (зразок 1) при $T=213$ К

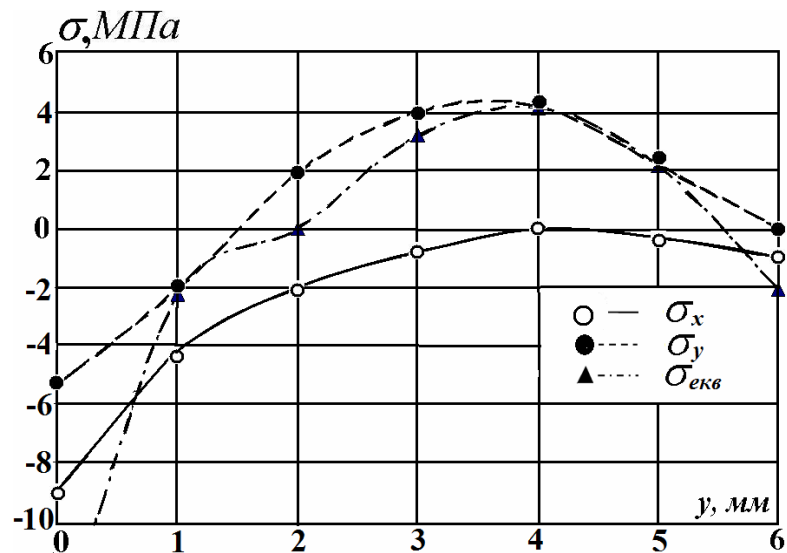


Рис. 24. Розподіл напружень σ_x , σ_y , $\sigma_{екв}$ у гомогенному триплексі з обрамленням (зразок 2) при $T=213K$

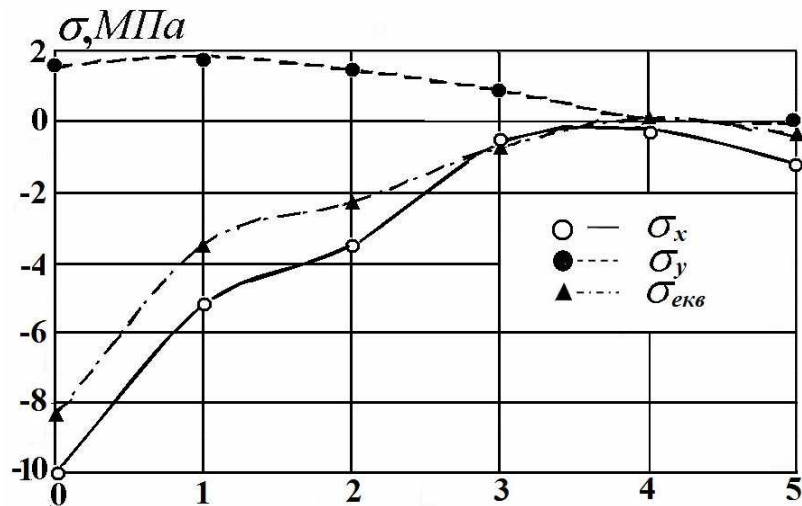


Рис. 25. Розподіл напружень σ_x , σ_y , $\sigma_{екв}$ у гетерогенному триплексі без обрамлення (зразок 3) при $T=213K$

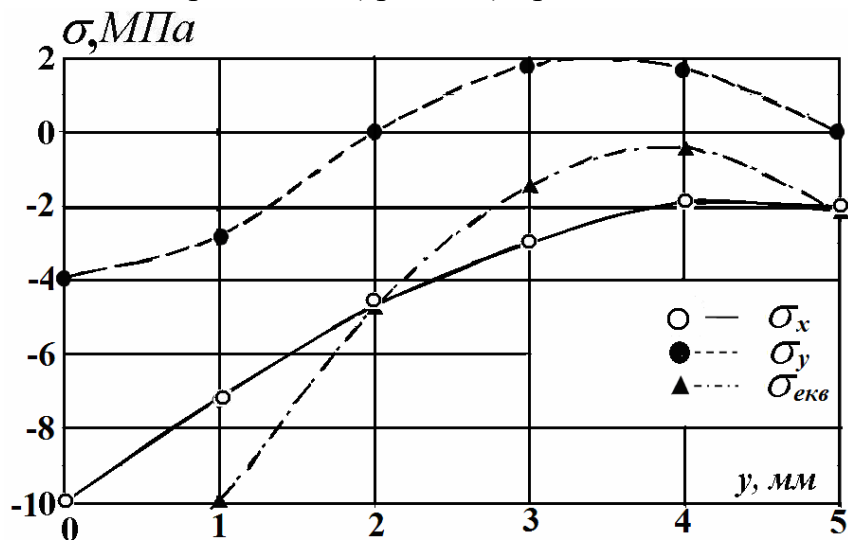


Рис. 26. Розподіл напружень σ_x , σ_y , $\sigma_{екв}$ у гетерогенному триплексі з обрамленням (зразок 4) при $T=213K$

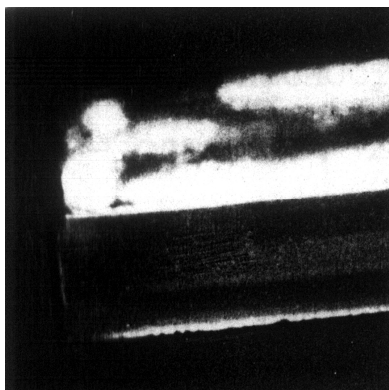


Рис. 27. Картина ізохроматичних смуг у триплексі при $T = 213 \text{ K}$.

На рис. 27 показано картину ізохроматичних смуг для гетерогенного триплекса. Вона демонструє неможливість використання методу смуг для вивчення НДС, що підтверджує необхідність застосування модифікованого компенсаційного методу, описаного у розділі 6.

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

$$\sigma_{\text{екв1}}^* (y=3 \text{ мм}) = 1,50 \text{ МПа (гомогенний}$$

триплекс без обрамлення);

$$\sigma_{\text{екв2}}^* (y=4 \text{ мм}) = 4,14 \text{ МПа (гомогенний триплекс з обрамленням);}$$

$$\sigma_{\text{екв3}}^* (y=4 \text{ мм}) = 0,08 \text{ МПа (гетерогенний триплекс без обрамлення);}$$

$$\sigma_{\text{екв4}}^* (y=4 \text{ мм}) = -0,43 \text{ МПа (гетерогенний триплекс з обрамленням).}$$

З точки зору міцності неорганічного силікатного скла, гетерогенні триплекси з обрамленням і без, практично, еквівалентні. А міцність склеюючого шару визначається дотичними напруженнями. За даними проведених досліджень мають місце такі співвідношення величин дотичних напружень:

$$\frac{\tau_{\text{max4}}}{\tau_{\text{max3}}} = 2,52 \quad \frac{\tau_{\text{max2}}}{\tau_{\text{max1}}} = 2,65 \quad (\text{при } T=213 \text{ K})$$

Отже, 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.

За результатами 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 найбільш небезпечне, з точки зору міцності, конструктивне рішення триплексу у виді гомогенного триплекса з обрамленням (зразок 2). Слід підкреслити, що 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.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Результатом виконаної роботи стало вирішення важливої наукової проблеми підвищення ефективності та функціональних можливостей експериментальних досліджень шляхом розробки експериментально-розрахункових оптичних методів визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків на основі аналізу параметрів тензора діелектричної проникності.

За результатами роботи сформульовано наступні висновки:

1. Розроблено експериментально – розрахунковий метод визначення НДС, на основі п'єзооптичного ефекту поглинаючого середовища (метод поглинання), який враховує зміну уявної частини компонент тензора діелектричної проникності (показника поглинання) при навантаженні твердого тіла. Метод визначає НДС твердих тіл з непрозорих у видимому діапазоні діелектриків, дає можливість одержати окремо квазіголовні напруження і деформації, а не їхні лінійні комбінації. Порогова чутливість вимірювання деформацій за інтенсивністю світла з використанням сучасних приймачів оптичного випромінювання – 10^{-6} , що на порядок переважає чутливість тензометрії – 10^{-5} .
2. Запропонований метод поглинання застосовано для визначення величин КІН. Побудовано формули і графіки залежності величини, яка характеризує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища – $\ln(I_0/I_1I_2)$ та величини КІН K_1 (де I_0 – інтенсивність світла для ненавантаженого стану об'єкта з тріщиною, I_1, I_2 – інтенсивності світла, поляризованого вздовж головних напрямків, при навантаженні об'єкта) для чотирьох довжин хвиль зонduючого випромінювання $\lambda=590, 600, 610, 620$ нм.
3. Розроблено експериментально – розрахунковий метод визначення НДС, який використовує ефект дифузного поверхневого розсіювання (метод дифузного поверхневого розсіювання) і базується на вимірюваннях перерозподілу інтенсивностей дзеркальної та дифузних складових розсіяного поверхнею об'єкта світлового потоку при локальній зміні його кривизни. Метод дає можливість проводити вимірювання від порогового значення (10^{-6}) до руйнування (для полімерів – 10^{-2} , для еластомерів – 10^0) і перевищує діапазон вимірювання спекл-інтерферометрії в 10^3 – 10^5 разів. Порогова чутливість методу (10^{-6}) перевищує на порядок порогову чутливість тензометрії (10^{-5}).
4. Запропонований метод дифузного поверхневого розсіювання застосовано для визначення КІН (моментів). Одержано формули, які визначають КІН (моментів) для симетричного відносно берегів тріщини моментного стану (визначення K_3) та несиметричного моментного стану (визначення K_3 і K_4). Побудовано графіки залежностей відносної зміни інтенсивності світла $\Delta I/I_0$, яка характеризує ефект дифузного поверхневого розсіювання та КІН (моментів) K_3 .
5. Створено та реалізовано моделі оптичних датчиків деформацій, які працюють на ефекті дифузного поверхневого розсіювання. Чутливим елементом однієї моделі датчика є вигнута пластинка, а другої – виїмка з дифузовідбиваючою поверхнею. Порогова чутливість обох датчиків 10^{-6} . Коефіцієнт підсилення відносної зміни інтенсивності світла при деформації поверхні об'єкта, рівний 20. Датчик у вигляді виїмки є частиною приповерхневого шару. Датчики вимірюють широкий діапазон деформацій: від порогового значення (10^{-6}) до руйнування (для полімерів $\approx 10^{-2}$).
6. Запропоновано критерій тензора діелектричної проникності для граничного стану діелектриків. Критерій базується на зміні компонентів тензора діелектричної проникності при навантаженні твердого тіла. Критерій інтегрально враховує вплив механічних та фізичних факторів (температури,

- вологості, радіації) на граничний стан діелектриків. У цьому критерії при зміні фізичних факторів змінюється не лише границя міцності (як у класичних механічних критеріях), а і вираз для еквівалентного напруження за рахунок зміни величини співвідношення оптико-механічних констант C_1/C_2 (для епоксидної смоли $C_1/C_2=1,76$, для органічного скла $C_1/C_2=1,43$, для неорганічного силікатного скла $C_1/C_2=1,07$).
7. Критерій ТДП можна застосувати для визначення довготривалої міцності полімерів при сталому навантаженні. Для граничних значень довготривалої міцності полімерів при $T=293K$ і $t=60xв$, деформаційна складова зміни компонент ТДП складає 80% напружена – 20%. Показано кореляційний зв'язок ($r = -0,664$) між змінами величин оптико-механічної константи C та модуля Юнга I роду E при опроміненні епоксидної смоли.
 8. Модифіковано поляризаційно-оптичний метод дослідження натурних об'єктів з тріщинами для малих за величиною (до 1λ , де λ – довжина хвилі зонduючого випромінювання) картин оптичної анізотропії.
 9. Розвинуто поляризаційно-оптичний метод визначення НДС, який використовує дві або чотири довжини хвилі зонduючого випромінювання, для визначення величин КІН. Одержано графічні залежності величин додаткового порядку ізохроматичних смуг для $\lambda_1 = 580$ нм, $\lambda_2 = 420$ нм та оптичної різниці ходу $\delta=1740$ нм; $\lambda_1 = 620$ нм, $\lambda_2 = 420$ нм, $\delta=2750$ нм. Метод доцільно застосовувати у випадку великих різниць оптичного ходу променів ($\delta > 8 \lambda$), а також значних градієнтів, коли важко визначити нульову ізохрому у методі смуг, а компенсаційні методи дають значну похибку.
 10. Досліджено кінетику руйнування та граничний стан неорганічного силікатного скла (як складової частини гомогенних та гетерогенних триплексів). За допомогою запропонованого критерію ТДП визначено величини еквівалентних критичних КІН, при руйнуванні склопластинок з крайовими тріщинами: $K_{екв}=0,45-0,60$ МПа·м^{1/2} (для розтягу пластин з крайовими тріщинами), $K_{екв}=0,41-0,52$ МПа·м^{1/2} (для триточкового згину).
 11. За критерієм ТДП оцінено руйнування пластинок з органічного скла (як складової частини гетерогенних триплексів) СОС-174, СОЗ-033.5, СОЗ-062, СОЗ-083, СОО-112 з крайовими тріщинами, які утворювали кути $80-85^\circ$ з напрямком розтягуючих зусиль. Середнє значення руйнуючого напруження для оргскла становило 9,92 МПа.
 12. На моделях з епоксидних смол ЕПСА та ЕД-20М змодельовано конструктивний та технологічний вплив обрамлення на розподіл КІН при проростанні поверхневих тріщин (надрізів) у наскрізні в склеюючому шарі триплексів. Показано, що обрамлення стримує ріст поверхневої тріщини – зменшує $K_{екв}$ для поверхневої тріщини відносно глибини $(a/h)=0,5$ у 1,58 рази для ближньої до обрамлення вершини тріщини та у 1,28 разів для дальньої вершини; для $(a/h)=0,7$ відповідні величини складають 1,57 і 1,24 та стимулює ріст наскрізної тріщини – для дальньої вершини $K_{екв}$ зростає у 1,21 рази.
 13. За допомогою модифікованих методик поляризаційно-оптичного методу та критерію тензора діелектричної проникності проведено комплексне дослідження напруженого та граничного станів при знижених температурах

(до $T=213K$) гомогенних та гетерогенних триплексів, з обрамленням і без, при можливій наявності дефектів типу тріщин у їх складових частинах (елементах): неорганічному силікатному склі, органічному склі та склеюючому шарі. Це дало змогу визначити вплив гетерогенності та обрамлення і одержати чисельні результати оцінки НДС та граничного стану для різних варіантів триплексів і вибрати оптимальний: гетерогенний триплекс без обрамлення.

СПИСОК ОСНОВНИХ ДРУКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Рудяк Ю. Термонапряженное и предельное состояние многослойных структур / Ю.Рудяк.– Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.– 128s.– ISBN 978-3-659-37210-0.
2. Рудяк Ю. Оптические методы механики твердого тела / Ю.Рудяк, Н.Пидгурский.– Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.– 128s. – ISBN 978-3-659-69350-2.
3. Кепич Т.Ю. Напряженное состояние тонкостенных сварных конструкций со сквозными и поверхностными трещинами в зоне шва / Т.Ю. Кепич, Ю.А. Рудяк // Журнал «Автоматическая сварка». 1988 №5, С. 9-13.– SCOPUS
4. Рудяк Ю.А. Оптичні дослідження міцності багатошарових структур із прозорих діелектриків / Ю.А. Рудяк, М.І. Підгурський // Фізико-хімічна механіка матеріалів.– Львів, ФМІ, 2015.– №2.– С.68-71.- SCOPUS
5. Рудяк Ю.А. Определение термонапряженного состояния смотровых окон пищевых аппаратов, изготовленных из триплексов / Ю.А.Рудяк // Процессы и аппараты пищевых производств: Изд. Санкт – Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. – Санкт – Петербург, 2013. - № 1. С. 36. – режим доступа к журналу: <http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=28284>.– РИНЦ
6. Рудяк Ю.А. Экспериментальное определение деформаций с использованием эффекта диффузного поверхностного рассеивания / Ю.А.Рудяк // Вестник Белгородского государственного технологического университета им.В.Г.Шухова, 2013.– № 2. – С. 94 – 96.
7. Оптические тензодатчики на основе эффекта диффузного поверхностного рассеивания / Н.И.Пидгурский, Ю.А.Рудяк, И.Н.Пидгурский и др. // Вестник Ташкентского технического университета, 2013. - № 1 (49). – С. 33 – 35.
8. Рудяк Ю.А. Экспериментальное определение граничного состояния оболочек из эпоксидной смолы с трещинами согласно физико-механического критерия / Ю.А. Рудяк // Вестник Ташкентского технического университета. Серия Химическая технология, контроль и управление, 2013. -№2(50). – С. 20-23.
9. Рудяк Ю.А. Экспериментальное определение граничного состояния пластин из органического стекла с трещинами согласно физико-механического критерия тензора диэлектрической проницаемости / Ю.А. Рудяк // Вестник Ташкентского технического университета. Серия Электроника и автоматика, 2013. -№2. – С. 24-28.
10. Визначення абсолютних значень та величин співвідношення оптико-механічних констант прозорих діелектриків / Ю.А.Рудяк, Г.І.Ткаченко, О.В.Грибков, Д.І.Шостак // Вісник НТУ «ХПІ», 2013. - № 11 (985). – С. 150 – 155.
11. Дослідження параметрів граничного стану для силікатного неорганічного скла / Ю.А.Рудяк, Г.І.Ткаченко, О.В.Грибков, Д.І.Шостак // Наукові праці Чорноморського державного університету, Миколаїв, 2012. – Випуск 191. – Том 203. – С.32 – 37.
12. Кепич Т.Ю. Оптичний метод визначення напружено-деформованого стану об'єктів шляхом аналізу поглинання світла. / Т.Ю.Кепич, О.В. Мильніков, Ю.А. Рудяк // Вісник КДУ, 2003. Серія фіз.-мат. науки. - В.5. – С. 45 – 53.

13. Рудяк Ю. Критеріальне оцінювання ресурсу полімерних елементів машин / Ю.Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2012. - № 4(68). – С. 88– 91.
14. Рудяк Ю. Фізичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання/ Ю.Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2013. - № 1 (69) . – С. 110 – 115.
15. Рудяк Ю.А. Визначення величин коефіцієнтів інтенсивності моментів за даними дифузного поверхневого розсіювання / Ю.А. Рудяк // Вісник Житомирського державного університету. Серія Машинознавство, 2013. - №1(64). – С. 8-11.
16. Рудяк Ю.А. Граничний стан елементів машин та конструкцій з діелектриків, коли руйнування проходить в умовах плоскої деформації / Ю.А.Рудяк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2013. - № 4 (193). – С. 224 – 226.
17. Рудяк Ю.А. Граничний стан елементів машин та конструкцій з діелектриків, коли руйнування проходить в умовах плоского напруженого стану/ Ю.А.Рудяк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2012. - № 14 (185). – Частина 2. - С. 112 – 115.
18. Рудяк Ю.А. Застосування ефекту дифузного поверхневого розсіювання для дослідження «зони шийкоутворення» біля вершини тріщини / Ю.А.Рудяк, Г.І.Ткаченко, О.В.Грибков // Вісник Хмельницького національного університету, 2013. - № 2. – С.70 – 72.
19. Рудяк Ю.А. Математичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання / Ю.А.Рудяк // Вісник Хмельницького національного університету, 2012. - № 6. – С. 264 – 267.
20. Рудяк Ю.А. Метод визначення величин коефіцієнтів інтенсивності напружень за даними вимірювання поглинання інтенсивності світла / Ю.А. Рудяк // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки, 2012. – №4. – С. 88 – 91.
21. Рудяк Ю.А. Метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для неоднорідного основного напруженого стану / Ю.А.Рудяк // Вісник національного авіаційного університету, Київ, 2012. - № 4. – С. 101 – 103.
22. Рудяк Ю.А. Оптимізація експериментально-розрахункового методу рішення задач механіки руйнування / Ю.А.Рудяк // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки, 2013. – № 1. – С. 72–75.
23. Рудяк Ю.А. П'єзооптичний ефект поглинального середовища / Ю.А. Рудяк // Вісник національного авіаційного університету, Київ, 2013. – №2. – С. 114-116.
24. Рудяк Ю.А. Фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків / Ю.А.Рудяк// Вісник Хмельницького національного університету, 2013. - № 1. – С. 275 – 277.
25. Рудяк Ю. Оптичні експериментально-розрахункові методи визначення НДС та граничного стану багатошарових структур з концентраторам / Ю.Рудяк, М. Підгурський // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2014.- №1. – С. 11-21.
26. А. с. СССР, М 5 кл. G 01B 11 / 16. Способ определения деформаций поверхности / Рудяк Ю.А.. - № 1716317 от 01.11.1991.
27. А. с. СССР, М 5 кл. G 01B 11 / 16. Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта / Рудяк Ю.А., Пизар В.Г. - № 1668860 от 08.04.1991.
28. А. с. СССР, М 5 кл. G 01B 11 / 18. Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта / А.В. Мыльников, Ю.А. Рудяк - № 1578460 от 15.03.1990.
29. А. с. СССР, М 5 кл. G 01B 11 / 18. Способ определения параметров напряженно-деформированного состояния объекта / Рудяк Ю.А.. - № 1670388 от 15.04.1991.
30. Підгурський М.І., Рудяк Ю.А. Експериментальне визначення моментного напруженого стану для тонких оболонок з тріщинами / М.І. Підгурський, Ю.А. Рудяк // Тези II наук.-техн. конф. «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті», - ТНТУ. 24.08.2013р. – С.31-32

31. Рудяк Ю.А. Граничний стан елементів машин та конструкцій з діелектриків, коли руйнування проходить в умовах плоскої деформації / Ю.А. Рудяк // Збірник наук. праць IV Міжнар. Наук.-практ. конф. «Інноваційні технології на залізничному транспорті». – 24-31 березня 2013р., Париж. – С.101-104
32. Рудяк Ю.А. Критерій граничного стану полімерів при довготривалому навантаженні / Ю.А. Рудяк, М.І. Підгурський // Матеріали X Міжн. наук.-практ. конф. «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2014», Полтава, 2014.– С. 45-47.
33. Рудяк Ю.А. Неруйнівні методи визначення напружено-деформованого стану елементів машин, виготовлених із неметалів / Ю.А.Рудяк, М.І. Підгурський // Тези II міжн. інтернет-конф. Вінниця, 2014. – С. 8. <http://tpz.vntu.edu.ua/files/2IntKonf/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%20%D0%9F%D0%94%D0%9C%D0%9F%D0%9A%202014.pdf>
34. Рудяк Ю.А. Оптичні експериментально-розрахункові методи визначення НДС та граничного стану елементів машин, виготовлених із неметалів. / Ю.А.Рудяк, М.І. Підгурський // Тези II Міжн. наук.-техн. конф. ТНТУ «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» Тернопіль, 2013. – С. 77.
35. Рудяк Ю.А., Поляризаційно-оптичний метод дослідження малих за величиною картин оптичної анізотропії. / Ю.А.Рудяк, М.І. Підгурський // Тези XI Міжн. наук.-практ. конф. «Розвиток наукових досліджень 2014», Полтава, 2014.– С. 36-38.
36. Рудяк Ю.А., Експериментальне дослідження НДС та граничного стану багатошарових структур (триплексів) з концентраторами. / Ю.А.Рудяк, М.І. Підгурський // Тези IX Міжн. наук.-практ. конф. «Наукові дослідження –теорія та експеримент 2013», Полтава, 2013.– С. 72-74.
37. Кепич Т.Ю. Новые исследования в экспериментальных методах определения напряжений и деформаций / Т.Ю.Кепич, А.В. Мыльников, Ю.А. Рудяк // XV SYMPOZIUM mechaniki eksperymentalnej ciata stalego.- Jachranca, 1992. с. 142-145.
38. Кепич Т.Ю. Оптический метод механики разрушения / Т.Ю.Кепич, Ю.А. Рудяк // XV SYMPOZIUM mechaniki eksperymentalnej ciata stalego.- Jachranca, 1992.С. 146-148
39. Кепич Т.Ю. Перспективы применения оптических методов в механике эластомеров / Т.Ю.Кепич, Ю.А. Рудяк // Тезисы докл. Междунар.симпоз. «Механика эластомеров». – Севастополь, 1994. – С. 70.
40. Мыльников А.В. Исследование прочности неоднородных стеклоизделий / А.В. Мыльников, Ю.А. Рудяк // Тезисы докл. III Всес. конф. «Механика неоднородных структур», Львов. 1991.ч.2. – С. 223
41. Мыльников А.В. Определение величины коэффициентов интенсивности напряжений методом фотоупругости / А.В. Мыльников, Ю.А. Рудяк, Р.Б. Твердоступ // Тернополь. – 1989. Деп. 7 в Укр.НИИТИ 15.06.89.
42. Мыльников А.В. Оптический способ определения механических напряжений, базирующийся на анализе поглощения света / А.В. Мыльников, Ю.А. Рудяк // Тезисы докл. IX научн.-техн.конф. «Фотометрия и её метрологическое обеспечение». Москва, 1992. С. 95.
43. Рудяк Ю.А. Исследование закономерностей разрушения стеклопластинок с краевыми трещинами / Ю.А. Рудяк, Р.Б. Твердоступ // Труды XIV научной конф. Молодых учёных Ин-та механики АН УССР Киев, 1989. –Деп. ВНИИТИ 2.08.89 г. №5164-В89. С. 173-177.
44. Рудяк Ю.А. Исследование напряженного состояния тонкостенных сварных конструкций с поверхностными трещинами в области шва поляризационно-оптическим методом / Ю.А. Рудяк // Сборник «Исследования в механике сплошных сред». Деп. в УкрНИИТИ 18.05.88, №1235. С.164-176.
45. Рудяк Ю.А. Исследование разрушения стекол / Ю.А. Рудяк, Р.Б. Твердоступ // Труды XIII научной конференции молодых ученых Ин-та механики АН УССР, Киев, 24-27 мая 1988, ч.1./Ин-т мех. АН УССР Киев, 1988. Деп.ВНИИТИ 27.12.88, №9071. - С.190-194.

46. Рудяк Ю.А. Исследование разрушения электровакуумных стекол при различных температурно-влажностных режимах / Рудяк Ю.А., Ю.Т. Романяк, И.М. Головатая // Тезисы докл. научно-техн. конф. молодых ученых «Повышение надёжности машин». Горький, 1989. – С.89.
47. Рудяк Ю.А. Экспериментальное исследование процесса разрушения электровакуумных стекол / Ю.А. Рудяк // Тезисы XI Всесоюзной конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», Обнинск, 1988, - ч. II – С. 55-57
48. Kepich T.Yu. Group of methods for creation of diffused optical fields / T.Yu. Kepich, Yu.A. Rudyak // Recent Advances in Experimental mechanics. – Proceedings of the 10th International Conference on Experimental mechanics.- Lisbon. – 18-22 Juli, 1994. – P.471-474.
49. Mylnikov A.V. Investigation of glass structural elements with stress concentrators by optical method / A.V. Mylnikov, Yu.A. Rudyak, R.B. Tverdostup // Recent Advances in Experimental mechanics. – Proceedings of the 10th International Conference on Experimental mechanics.- Lisbon. – 18-22 Juli, 1994. – P.201-204.

АНОТАЦІЯ

Рудяк Ю.А. Оптичні експериментально-розрахункові методи визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04. – механіка деформівного твердого тіла.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукової проблеми – підвищення ефективності та функціональних можливостей експериментальних досліджень шляхом розробки експериментально-розрахункових оптичних методів визначення напружено-деформованого та граничного стану прозорих діелектриків на основі аналізу параметрів тензора діелектричної проникності. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено новий метод визначення НДС, який використовує п'єзооптичний ефект поглинаючого середовища (метод поглинання – МП), одержано формули визначення КІН за даними МП. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено новий метод визначення НДС, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання (МДПР), одержано формули визначення КІН (моментів) за допомогою даного методу, а також сумісним вимірюванням даних МДПР та фотопружності. Розроблено та реалізовано модель оптичного тензодатчика, який працює на основі МДПР, обґрунтовано застосування методу для оцінки «зони шийкоутворення» біля вершини тріщини. Розвинуто поляризаційно-оптичний метод для розв'язання таких задач експериментальної механіки руйнування, як визначення КІН K_I , K_{II} , K_{III} , для неоднорідного основного напруженого стану та малих за величиною (до 1λ) картин оптичної анізотропії, для випадків великих різниць оптичного ходу ($>8\lambda$) та значних градієнтів, коли важко визначити нульову ізохрому. Розроблено фізико-механічний критерій граничного стану діелектриків (критерій тензора діелектричної проникності - ТДП), експериментально досліджено, згідно критерію ТДП, граничний стан пластин з оргскла та оболонок з епоксидної смоли з тріщинами. За допомогою модифікованих методик поляризаційно-оптичного методу та розробленого фізико-механічного критерію ТДП проведено комплексне дослідження напруженого та граничного станів багат шарових структур (триплексів) при

температурі $T=213\text{ K}$ і при можливій наявності тріщиноподібних дефектів у їх складових частинах (елементах).

Ключові слова: оптичні експериментально-розрахункові методи, прозорі діелектрики, тензор діелектричної проникності, коефіцієнт інтенсивності напружень, багатошарові структури, триплекси, тріщини

АННОТАЦИЯ

Рудяк Ю.А. Оптические экспериментально-расчетные методы определения напряженно-деформированного и предельного состояния прозрачных диэлектриков.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04. - Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы – повышению эффективности и функциональных возможностей экспериментальных исследований путем разработки экспериментально-расчетных оптических методов определения напряженно-деформированного и предельного состояния прозрачных диэлектриков на основе анализа параметров тензора диэлектрической проницаемости.

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод определения НДС, который использует пьезооптический эффект поглощающей среды (метод поглощения - МП), действие которого основано на анализе величин изменения мнимой части компонент тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) при нагружении объекта. Метод предоставляет принципиальную возможность определения НДС объектов, изготовленных из непрозрачных в видимом диапазоне диэлектриков и позволяет определять сразу отдельно квазиглавные напряжения и деформации, а не их линейные комбинации, как в поляризационно-оптических (разности) и когерентно-оптических (суммы) методах. Предложенный метод поглощения применен для определения величин КИН при исследовании объектов, содержащих трещиноподобные дефекты (получены формулы определения КИН по данным МП).

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод определения НДС, который использует эффект диффузного поверхностного рассеивания (метод диффузного поверхностного рассеивания – МДПР). Предложенный метод основывается на измерениях перераспределения интенсивностей зеркальной и диффузных составляющих рассеянного поверхностью объекта светового потока при локальном изменении ее кривизны. Метод позволяет проводить измерения в широком диапазоне изменения величин деформаций: от порогового значения чувствительности до разрушения объектов (10^{-2} – для полимеров, 10^{-0} - для эластомеров), значительно превышая диапазон измерения спекл-интерферометрии. Получены формулы определения КИН (моментов) по данным МДПР для симметричного относительно берегов трещины моментного состояния (определения K_3) и несимметричного моментного состояния (определения K_3 и K_4).

Разработаны и реализованы модели оптических датчиков деформаций, которые работают на эффекте диффузного поверхностного рассеивания (датчики

МДПР). Чувствительным элементом датчика первого конструктивного исполнения является изогнутая пластинка, а второго – выемка с диффузорорассеивающей поверхностью. Датчик МДПР, чувствительным элементом которого является выемка, не крепится определенным образом на поверхности объекта, а является частью приповерхностного слоя. Такая конструкция позволяет повысить точность измерений за счет отсутствия погрешностей в системе “датчик–склеивающий слой–поверхность объекта”.

Предложен физико-механический критерий предельного состояния диэлектриков (критерий тензора диэлектрической проницаемости – ТДП). Критерий основывается на изменении компонент тензора диэлектрической проницаемости при нагружении объекта и позволяет интегрально учитывать влияние как механических, так и физических факторов (температуры, влажности, радиации) на предельное состояние диэлектриков. В данной критерии при изменении физических факторов изменяется не только предел прочности (как в классических механических теориях), а и выражение для эквивалентного напряжения за счет изменения величины соотношения оптико-механических констант C_1/C_2 . Предложенный критерий ТДП позволяет определять долговременную прочность полимеров при постоянной нагрузке.

Модифицирован поляризационно-оптический метод исследования натуральных объектов с трещинами для малых по величине (до 1λ , где λ – длина волны зондирующего излучения) картин оптической анизотропии и для случаев больших разностей оптического хода ($>8\lambda$) и значительных градиентов, при которых сложно определить нулевую изохрому.

Исследована кинетика разрушения и предельное состояние неорганического силикатного стекла (как составной части гомогенных и гетерогенных триплексов). Проанализированы, при помощи критерия ТДП, данные разрушения пластин из органического стекла (как составной части гетерогенных триплексов) с краевыми трещинами. На моделях из эпоксидных смол ЭПСА и ЭД-20М показано конструкционное и технологическое влияние обрамления на распределение величин КИН при прорастании поверхностных трещин (надрезов) в сквозные в склеивающем слое триплексов.

С помощью модифицированных методик поляризационно-оптического метода и разработанного физико-механического критерия ТДП проведено комплексное исследование напряженного и предельного состояния гомогенных и гетерогенных триплексов при сниженных температурах (до $T=213\text{ K}$), с обрамлением и без, при возможном наличии трещиноподобных дефектов в их составных частях (элементах): неорганическом силикатном стекле, органическом стекле и склеивающем слое. Это позволило определить влияние гетерогенности и обрамления, а также получить численные результаты оценки НДС и предельного состояния для различных вариантов триплексов и выбрать оптимальный: гетерогенный триплекс без обрамления.

Ключевые слова: оптические экспериментально-расчетные методы, прозрачные диэлектрики, тензор диэлектрической проницаемости, коэффициент интенсивности напряжений, многослойные структуры, триплексы, трещины.

SUMMARY

Rudyak Yu.A. **Optical experimental and computational methods for determining the stress-strain and boundary states of transparent dielectrics.**

Thesis for the Doctor Degree in Technical Sciences (specialty 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids).

Thesis is dedicated to the solution of a scientific problem – developing of the optical experimental and computational methods for determining the stress-strain and limit states of transparent dielectrics on the basis of the analysis of the dielectric penetration tensor.

The author theoretically justified and experimentally confirmed the new method for determining the SDS, that uses the piezooptic effect of absorbing environment (the absorption method – AM), obtained the formulae for finding SIF accord King to the data of the AM. The author theoretically justified and experimentally confirmed a new method for determining the SDS on the basis of the method of diffuse surface scattering (MDSS), obtained the formulae for finding SIF with help of this method and due to the joint estimation of data of the MDSS and photo resilience as well. The author developed and realized the model of optical strain gauge that works on the basis of the MDSS, the application of the method for estimation of “neck-like formation area” at the crack tip. The author developed the polarized and optical method for solution of such tasks of experimental mechanics of destruction like SIF F_1 F_2 F_3 in the case of finding heterogeneous stress state and the small size ($<1\lambda$) pictures of optical anisotropy in the case of significant optical motion's differences ($>8\lambda$) and significant gradients when it is difficult to determine the zero isochromat. The author developed the physical-mechanical criterion of boundary state of dielectrics (the criterion of dielectric penetration tensor (DPT)) and experimentally investigated according to the criterion of DPT the boundary state of the organic glass plates and epoxy resin's casing with cracks. Due to the modified polarized and optical method and developed physical-mechanical criterion of DPT was conducted the complex study of stress and boundary states of multilayer structures (triplexes) with the temperature $T = 213$ K and with the possible availability of crack-like defects in their component parts (elements).

Key words: optical experimental and computational methods, transparent dielectrics, dielectric penetration tensor, state intensity factor, multilayer structures, triplexes, cracks.

Підписано до друку 27.08.2015. Формат 60х84/16. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Ум. др. арк. 1,9. Папір офсетний № 1.
Наклад 100. Зам. № 271.

Видавництво “Укрмедкнига”
Тернопільського державного медичного університету імені І.Я. Горбачевського,
майдан Волі, 1, м. Тернопіль, 46001, Україна