

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ВОЙТОВИЧ ЛЕОНІД ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 539.3

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО ТА ГРАНИЧНОГО
СТАНІВ ПРОЗОРИХ КОМПЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ) ІЗ
ГЕОМЕТРИЧНИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-
ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2017

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 керівник: доктор технічних наук, доцент **Рудяк Юрій Аронович**, Тернопільський державний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського, завідувач кафедри медичної фізики діагностичного та лікувального обладнання, м. Тернопіль

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

доктор технічних наук, професор **Марущак Павло Орестович**, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв, м. Тернопіль

Захист відбудеться “___” _____ 2017 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 ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий “___” _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д58.052.01



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасній техніці в останні роки намітилась тенденція широкого використання неметалічних матеріалів, які не тільки є заміниками металів, але в деяких випадках застосовуються як самостійні конструкційні матеріали. Серед них особливе місце належить композитним матеріалам, вироби з яких мають підвищені характеристики міцності та надійності. Композитними матеріалами, які широко застосовуються у сучасному космічному, авіа-, суднобудуванні є склопластики, матрицею яких є епоксидна смола, а наповнювачем – скловолокна.

Окремим напрямком механіки деформівного твердого тіла є механіка руйнування тіл з дефектами, невід’ємним елементом якої є методи визначення розподілу напружень біля отворів, тріщин, включень. Модифікація таких методів та достатньо повний огляд результатів відображені в роботах Андрейківа О.Є., Божидарника В.В., Бережницького Л.Т., Бурака Я.Й., Василенка А.Т., Григоренка Я.М., Гузя О.М., Камінського А.О., Кіта Г.С., Космодаміанського О.С., Кушніра Р.М., Леонова М.Я., Панасюка В.В., Підстригача А.С., Сулима Г.Т., Черепанова Г.П., Шваб'юка В.І., Яснія П.В., F. Erdogan, R. Irwin, T. Mura та інших. Але визначення напружено-деформованого стану (НДС) натурних елементів машин і конструкцій, виготовлених із склопластику, які працюють у певних реальних умовах із врахуванням в'язкопружності анізотропних тіл та при наявності тріщин, отворів різної форми не завжди можна точно одержати за допомогою чисельних методів. Оскільки склопластики – прозорі неметалічні матеріали, особливо ефективно застосовувати для оцінки їх напружено-деформованого та граничного станів оптичні методи механіки.

Одним із основних експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла є поляризаційно-оптичний метод (ПОМ) або метод фотопружності. Характерним для методу є той факт, що часто характер розподілу напружень і деформацій може бути встановлений без додаткової обробки експериментальної інформації, а лише за картиною ізохроматичних смуг. Поряд з цим метод фотопружності допускає і точний кількісний аналіз напружень і деформацій. Самостійне значення метод отримує при дослідженні конструкцій складної форми, де аналітично або чисельно визначити напружено-деформований стан надзвичайно важко. Значний внесок у розвиток ПОМ зроблено рядом таких дослідників, як Абен Х.К., Аблаут Г.М., Александров А.Я., Ахметзянов М.Х., Бугаков І.І., Васильченко І.П., Варданян Г.С., Гриліцький Д.В., Дюреллі А., Жилкін В.А., Касаткін Б.С., Кепич Т.Ю., Книш В.В., Констандов Ю.А., Лобанов Л.М., Мазур К.І., Малезик М.П., Марінченко В.М., Мерзлюк В.В., Мильніков О.В., Наконечний В.В., Нетребко В.П., Підгурський М.І., Пригоровський М.І., Радченко М.М., Рудяк Ю.А., 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., Heeker F.W., Zhengmei L. та іншими.

Однак, поляризаційно-оптичний метод у його класичних підходах та запропонованих даними авторами модифікаціями не завжди дозволяє визначити

напружено-деформований та граничний стани для об'єктів, виготовлених із склопластиків. Введення часу при вивченні напружено-деформованого стану елементів машин і конструкцій, виготовлених із склопластику істотно ускладнює їх теоретичний аналіз (та чисельний розрахунок), особливо при наявності геометричних концентраторів. Окремого дослідження також потребує аналіз НДС та міцності деталей машин із склопластику, які містять геометричні концентратори (тріщини, отвори різної форми) та перебувають під дією динамічного навантаження.

Отже, підвищення ефективності та функціональних можливостей поляризаційно-оптичного методу шляхом його розвитку для визначення напружено-деформованого та граничного станів склопластиків є актуальним і важливим науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні наукові результати дисертації отримано на кафедрі технології та обладнання зварювального виробництва Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та у ході виконання планових науково-дослідних робіт, що проводилися на кафедрі опору матеріалів, теоретичної та будівельної механіки "Методи розв'язання лінійних та нелінійних задач напружено-деформованого стану, динаміки та стійкості дискретних і континуальних систем" (номер державної реєстрації № 0106U010493) та на кафедрі теоретичної механіки інженерної графіки та машинознавства "Статичні та динамічні розрахунки на міцність, технологічні процеси обробки, методи комп'ютерного моделювання деталей машин і механізмів, які використовують у водогосподарському, будівельному виробництві та інших галузях промисловості, окремі аспекти викладання дисциплін кафедри" (державний реєстраційний номер 0114U001614) Національного університету водного господарства та природокористування, де автор був виконавцем.

Мета й задачі дослідження. Мета роботи – підвищити ефективність та функціональні можливості поляризаційно-оптичного методу шляхом його розвитку для визначення напружено-деформованого та граничного станів склопластиків.

Для її досягнення необхідно було вирішити наступні завдання:

- розвинути поляризаційно-оптичний метод для дослідження прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами;
- визначити величини коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин у склопластику, які знаходяться поруч з отворами та виходять на їх контур;
- розвинути поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків з геометричними концентраторами;
- визначити напружений стан пластин із центральним отвором та тріщиною при імпульсному навантаженні;
- дослідити основні закономірності процесу руйнування елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори.

Об'єктом дослідження є прозорі композити (склопластики), які містять геометричні концентратори.

Предметом дослідження є напружено-деформований та граничний стан прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами при довготривалому та динамічному навантаженні.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження та використання аналітичного апарату базуються на положеннях механіки суцільного середовища, в'язкопружності анізотропних тіл, механіки руйнування, мікрональної та динамічної фотопружності.

Зразки із прозорих композитів (склопластиків) досліджувались поляризаційно-оптичним методом на координатно-синхронних поляриметрах КСП-5 та КСП-10, а також за допомогою фотоелектричного реєстратора порядку смуг інтерференції. При дослідженнях застосовувались стандартизовані матеріали та моделі, на базі епоксидно-діанової смоли.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Розвинуто поляризаційно-оптичний метод визначення напружено-деформованого стану для склопластику (в'язкопружного конструктивно-ортотропного середовища).
- Вперше отримано величини КІН для тріщин у склопластику, які знаходяться поруч із отворами та виходять на їх контур.
- Розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків із геометричними концентраторами.
- Вперше одержано величини КІН для тріщини поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні.
- Вперше встановлено чисельні дані руйнування елементів конструкцій із склопластику, що містять геометричні концентратори.

Практичне значення отриманих результатів:

- розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами;
- досліджено величини коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин у склопластику, які знаходяться поруч з отворами та виходять на їх контур, що надало можливість оцінити міцність таких елементів машин;
- розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків з геометричними концентраторами;
- досліджено процес руйнування елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори, що надало можливість визначення граничного стану даних елементів.

Отримані в роботі методологія експерименту та результати досліджень передано для використання зацікавленим організаціям: ДП “Антонов” – дані про напружено деформований стан та руйнування в'язкопружних композитних матеріалів в умовах довготривалого навантаження (акт про реалізацію дисертаційної роботи від 14.04.2015 р.); ДП “Автоскладальний завод № 1” ПАТ “Автомобільна компанія Богдан Моторс” (акт впровадження № 421/01-25 від 21.07.2014 р.) – результати досліджень з фотопружного моделювання нестационарних задач механіки руйнування.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, викладені в дисертаційній роботі, належать автору. Сумісно з науковим керівником здійснювались постановка задачі, формулювання висновків. Проведення аналізу взаємозв'язків між напружено-деформованим станом та оптичними характеристиками, отримання робочих співвідношень для проведення експерименту, планування та розробка

методики дослідження, формулювання задач механіки руйнування проводилось автором самостійно.

В роботах [1-4] автор брав участь у дослідженнях і обговоренні результатів. У роботах [5-8] автору належить проведення експерименту й аналіз отриманих результатів. У роботах [9-18] автор застосував поляризаційно-оптичний метод для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу вершини тріщини в ортотропній пластині.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися на: 6-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів у Львові (Львів, 2003), міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми механіки” (Київ, 2003), VIII Міжнародній науковій конференції “Математичні проблеми механіки неоднорідних структур” (Львів, 2010); конференції молодих учених “Підстригачівські читання 2010” (Львів, 2010); IV конференції молодих учених із сучасних проблем механіки і математики імені академіка Я. С. Підстригача КМУ СПММ–2011 (Львів, 2011); XIX, XX, XXI, XXII, XXIII Міжнародній науковій школі ім. академіка С.А. Христиановича “Деформування і руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і виробках” (Алушта, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013), 4-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (Львів, 2014); міжнародній науково-практичній конференції “Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук” (Миколаїв, 2016).

Дисертаційна робота в цілому обговорювалась на науковому семінарі кафедри опору матеріалів, теоретичної та будівельної механіки факультету будівництва та архітектури (2015 р.) та на науковому міжкафедральному семінарі кафедри теоретичної механіки інженерної графіки та машинознавства (2016 р.) Національного університету водного господарства та природокористування; на розширеному семінарі відділу міцності зварних конструкцій Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 18 публікаціях, з них 16 – статей, 2 – тези конференцій. Загалом 8 публікацій відповідають вимогам МОН України щодо публікацій результатів дисертаційних робіт у фахових наукових виданнях. 4 статті [2-5] опубліковані у виданнях України, які включені до міжнародної науково метричної бази (SCOPUS). Одноосібних робіт – 1 [14].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (200 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 159 сторінок (з них 129 – основний текст). Вона містить 42 рисунки та 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про публікації і апробацію основних результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовано роботи, які присвячені методам визначення і дослідження напружено-деформованого стану матеріалів з концентраторами напружень методом фотов'язкопружності та динамічної фотопружності.

Важливе місце у розв'язанні задач механіки руйнування займають експериментальні оптичні методи. Одним із найбільш розвинених є поляризаційно-оптичний метод. З його допомогою можна проводити ефективне моделювання та дослідження прозорих натурних конструкцій з концентраторами.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, відзначено, що можливості існуючих аналітичних, чисельних та експериментальних методів механіки не завжди дозволяють ефективно вивчати НДС та граничний стан елементів машин та конструкцій, виготовлених із діелектриків, особливо при наявності геометричних концентраторів.

У другому розділі викладено дані про матеріали, які використовувались для досліджень та технологію їх створення. Крім того, у розділі наводяться результати дослідження оптико-механічних характеристик полімерних матеріалів на базі епоксидних смол одностадійного тверднення ЕД-20М, ЕД-16 та Е-скла.

Наведено технологію створення прозорого композиту (склопластика). Матрицею склопластика є епоксидно-діанові смоли ЕД-20М та ЕД-16, а армуючими елементами – волокна з матеріалу Е-скло. Експериментально визначено фотопружні константи склопластиків для різних значень армуючого волокна. Описано процес створення дефектів типу тріщин у матриці композиту. Тріщини по ширині 0,15 мм утворювались пропилюванням, після чого зразок піддавали дозованому силовому впливу. У результаті, тріщина підростала і отримували концентратор напружень наближений до ідеальної тріщини.

Викладено дані про апаратуру, за допомогою якої проводились експериментальні дослідження: координатно-синхронні поляриметри КСП-5, КСП-10, фотоелектричний реєстратор порядку смуг інтерференції. Фотопружні вимірювання оптичної анізотропії у тонкостінних об'єктах виготовлених із склопластиків проводили за допомогою координатно-синхронного поляриметра КСП-5.

У третьому розділі застосовано поляризаційно-оптичний метод для дослідження конструктивних ортотропних тіл, якими є склопластики. Наведено основні співвідношення в'язкопружності, фотов'язкопружності, лінійної теорії в'язкопружності ортотропних тіл.

Наведено методику визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) біля тріщин в ортотропних в'язкопружних пластинах за даними оптичних вимірів при довготривалому навантаженні. Для отримання співвідношення, що пов'язує порядок інтерференційної смуги m із величинами КІН. розглянуто пластину з лінійно-в'язкопружного композиту, в центрі якої розміщена тріщина (рис. 1).

Для отримання співвідношень, що визначають КІН за експериментально отриманими величинами порядку інтерференційних смуг $m(t)$, використовуємо відповідні рівняння механіки руйнування в'язкопружних тіл (Кортен Х.Г.).

Замінюючи в них пружні сталі функціями повзучості $\psi_{ij}(t)$, отримаємо співвідношення для компонент напружень $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ біля вершини тріщини.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \{K_I(t)\xi_1(t)\xi_2(t)[\xi_2(t)n_2(t) - \xi_1(t)n_1(t)]/A(r,t)\} + \{K_{II}[\xi_1^2(t)p_1(t) - \\ &- \xi_2^2(t)p_2(t)]/A(r,t)\} + \sigma_{Ox}; \\ \sigma_{yy} &= \{K_I(t)\xi_1(t)[\xi_2(t)n_1(t) - \xi_1(t)n_2(t)]/A(r,t)\} + \\ &+ \{K_{II}[p_2(t) - p_1(t)]/A(r,t)\}; \\ \tau_{xy} &= K_I(t)\xi_1(t)\xi_2(t)[p_1(t) - p_2(t)]/A(r,t) + \\ &+ K_{II}(t)[\xi_2(t)n_2(t) - \xi_1(t)n_2(t)]/A(r,t);\end{aligned}\quad (1)$$

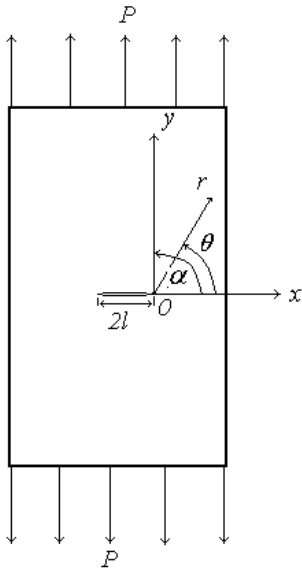


Рис. 1. Схема навантаження пластини

де прийняті позначення: K_I, K_{II} — коефіцієнти інтенсивності напружень: $K_I = \sigma_0 \sin^2 \alpha [\pi l(t)]^{1/2}$; $K_{II} = \sigma_0 \sin \alpha \cos \alpha [\pi l(t)]^{1/2}$; σ_{Ox} — напруження дальнього поля; $2l$ — довжина тріщини; r, θ — полярні координати.

$$n_j(t) = \frac{1}{\sqrt{\nu_j}} \cos \frac{\gamma_j}{2}; \quad \rho_j = \frac{1}{\sqrt{\nu_j}} \sin \frac{\gamma_j}{2};$$

$$\operatorname{tg} \gamma_j = \xi_j(t) \operatorname{tg} \theta; \quad \nu_j(t) = \sqrt{\cos^2 \theta + \xi_j^2(t) \sin^2 \theta};$$

$$A(r,t) = \sqrt{2\pi} [\xi_2(t) - \xi_1(t)]; \quad i \xi_j(t) = \mu_j(t);$$

$$-i \bar{\xi}_j(t) = \bar{\mu}_j(t); \quad (j=1,2).$$

$\mu_j(t)$ — комплексні параметри, яким відповідають комплексно зв'язані корені характеристичного

рівняння (Лехницький С.Г.):

$$\mu^4(t) + \{[2\psi_{12}(t) + \psi_{66}(t)]/\psi_{11}(t)\mu^2(t) + \psi_{22}(t)/\psi_{11}(t)\} = 0; \quad (2)$$

Запишемо в квазіпружному наближенні рівняння фотов'язкопружності:

$$\begin{aligned}\left[\frac{m(t)}{h}\right]^2 &= \{\cos^2 \theta [F_{11}(t)\sigma_{xx}(t) - F_{22}(t)\sigma_{yy}(t)] + \sin^2 \theta [F_{11}(t)\sigma_{yy}(t) - F_{22}(t)\sigma_{xx}(t)] + \\ &+ \sin 2\theta [F_{11}(t) + F_{22}(t)]\tau_{xy}(t)\} + \{\sin 2\theta F_{12}(t)[\sigma_{xx}(t) - \sigma_{yy}(t)] - 2\cos 2\theta F_{12}(t)\tau_{xy}(t)\}^2\end{aligned}\quad (3)$$

де $F_{ij}(t)$ — функція оптичної повзучості.

При розтягуванні пластини під кутом $\alpha = 90^\circ$ до тріщини і вимірюванні $m(t)$ уздовж полярного радіусу r , від вершини тріщини під кутом $\theta = 90^\circ$ (рис. 1), рівняння (1) з врахуванням (3) подамо у вигляді:

$$\sigma_{xx}(t) = \frac{K_I(t)}{2\sqrt{\pi r}} \frac{\xi_1(t)\xi_2(t)}{\sqrt{\xi_1(t)+\sqrt{\xi_2(t)}}} + \sigma_{0x}; \sigma_{yy}(t) = \frac{K_I(t)}{2\sqrt{\pi r}} \frac{b(t)}{\eta(t)\xi_1(t)\xi_2(t)};$$

$$\tau_{xy}(t) = \frac{K_I(t)}{2\sqrt{\pi r}} \frac{[\xi_1(t)\xi_2(t)]^{1/2}}{a(t)}, \quad (4)$$

де $a(t) = \xi_2^{1/2}(t) - \xi_1^{1/2}(t)$; $b(t) = \xi_1^2(t) + \xi_1(t)\xi_2(t) + \xi_2^2(t)$; $c(t) = \xi_2^{3/2}(t) + \xi_1^{3/2}(t)$.

$$[m(t)/h]^2 = [F_{11}(t)\sigma_{yy}(t) - F_{22}(t)\sigma_{xx}(t)]^2 + 4F_{12}^2(t)\tau_{xy}^2(t). \quad (5)$$

Підставляючи вирази для напружень з (4) в (5), отримаємо рівняння зв'язку порядку інтерференційної смуги $m(t)$ з величинами K_I і σ_{0x} у вигляді:

$$[(m(t)/h)]^2 = \frac{K_I^2(t)}{4\pi r} \{F_{11}^2(t)b(t)/c^2(t)\xi_1(t)\xi_2(t) + F_{22}^2(t)[\xi_1(t)\xi_2(t)]^2/a^2(t) +$$

$$+ 4F_{12}^2(t)\xi_1(t)\xi_2(t)/a^2(t) - 2F_{11}(t)F_{22}(t)b(t)[\xi_1(t)\xi_2(t)]^{1/2}/a(t)c(t)\} + \quad (6)$$

$$+ \frac{K_I(t)\sigma_{0x}}{2\sqrt{\pi r}} \{\xi_1(t)\xi_2(t)/a(t) + b(t)/c(t)[\xi_1(t)\xi_2(t)]^2\} + F_{22}^2(t)\sigma_{0x}^2.$$

Для випадку розтягування пластини під кутом $\alpha = 45^\circ$ до напрямку тріщини і виміру порядків інтерференційних смуг $m(t)$ уздовж радіусу, який виходить з вершини тріщини під кутом $\theta = 0^\circ$, вирази (4) і (5) набудуть вигляду:

$$\sigma_{xx}(t) = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}} \xi_1(t)\xi_2(t) + \sigma_{0x}; \sigma_{yy}(t) = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}}; \tau_{xy}(t) = \frac{K_{II}(t)}{\sqrt{2\pi r}}; \quad (7)$$

$$[m(t)/h]^2 = [F_{11}(t)\sigma_{xx}(t) - F_{22}(t)\sigma_{yy}(t)]^2 + 4F_{12}^2(t)\tau_{xy}^2(t). \quad (8)$$

З рівностей (7) і (8) отримаємо рівняння зв'язку величин $m(t)$ і K_I , K_{II} , σ_{0x} для вказаного випадку навантаження пластини. У результаті маємо:

$$[m(t)/h]^2 = K_I^2(t)\{F_{11}^2(t)[\xi_1(t)\xi_2(t)]^2 + F_{22}^2(t) - 2F_{11}(t)\xi_1(t)\xi_2(t)\}/2\pi r +$$

$$+ K_{II}^2(t)2F_{12}^2(t)/\pi r + K_I(t)\sigma_{0x}[2F_{11}^2(t)\xi_1(t)\xi_2(t) - 2F_{11}(t)F_{22}(t)]/\sqrt{2\pi r} + F_{11}^2(t)\sigma_{0x}^2. \quad (9)$$

Досліджували КІН поляризаційно-оптичним методом на пластинах з композитів, з епоксидною матрицею ЕД-16 (100 масових частин), заполімеризованою поліетиленполіаміном ПЕПА (12 мас. ч.) та пластифікованою поліефірами (10 мас. ч). Механічні та оптичні властивості матеріалів

досліджувалися на зразках у вигляді подвійних лопаток (ГОСТ 9550 - 84), вирізаних з пластин уздовж головних напрямків армування $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$ і під кутом $\theta = 45^\circ$ до них. Зразки розтягували в умовах повзучості. Записували і вимірювали деформації за допомогою розетки з двох ортогонально розташованих фольгових тензорезисторів та тензомоста КСТ-4. Зміну порядків інтерференційних смуг реєстрували координатно-синхронним поляриметром КСП-10. За відомими значеннями деформацій $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ і розтягуючим зусиллям спочатку визначалися функції повзучості $\psi_{ij}(t)$, а потім комплексні параметри $\mu_j(t)$ з рівняння (2). Аналогічно за значеннями порядку інтерференційних смуг $m(t)$ і розтягуючим зусиллям визначалися функції оптичної повзучості $F_{ij}(t)$, за відомою методикою. Значення функцій $\psi_{ij}(t)$ і параметрів $\xi_{ij}(t)$ та функцій $F_{ij}(t)$ для деяких моментів часу наведені в таблиці.

Пластини для експериментального визначення КІН були товщиною 2,5 мм, шириною 55 мм, довжиною 200 мм. Пластину навантажували під кутом $\alpha = 90^\circ$ до тріщини довжиною $2l = 7$ мм рівномірно розподіленою силою $P = 850$ Н. Через певні інтервали часу, в полі координатно-синхронного поляриметра КСП-10 за картинами ізохром (рис. 2), визначали координати інтерференційних смуг вдовж

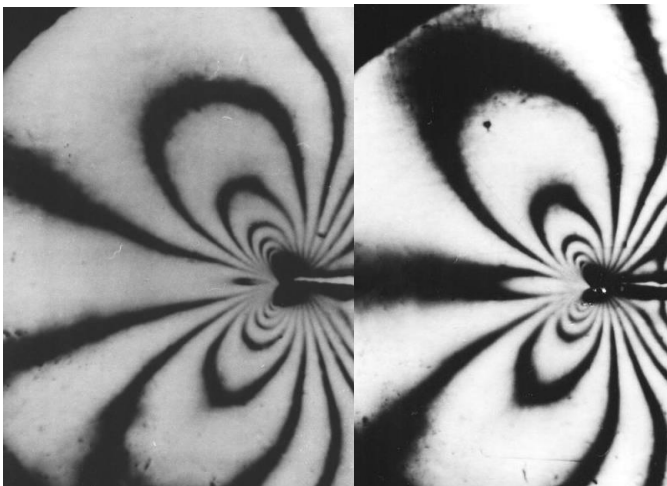


Рис. 2. Картини ізохром біля вершини тріщини

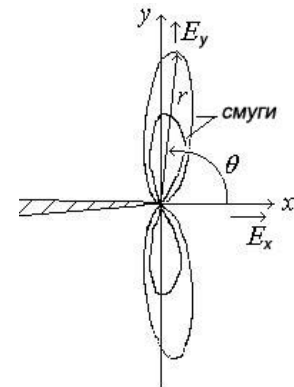


Рис. 3. Схема визначення величин r і θ

радіуса r від вершини тріщини під кутом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 3) і будували графіки розподілу порядків $m = f(r)$ (рис. 4). Графіки 1-4 відповідають значенням часу $t = 0; 10; 30; 60$ хвилин; (рис. 4, а) – для розтягу зразку під кутом $\alpha = 90^\circ$ до тріщини ($\theta = 90^\circ$); (рис. 4, б) – при $\alpha = 45^\circ$ ($\theta = 0^\circ$).

Порядки смуг m визначали компенсаційним методом Сенармона для двох довжин хвиль $\lambda_1 = 0.456 \cdot 10^{-6}$ м і $\lambda_2 = 0.578 \cdot 10^{-6}$ м. Похибка таких вимірювань не перевищує 4%. При розтягу пластини під кутом $\alpha = 45^\circ$ до тріщини рівномірно розподілена сила становила $P = 990$ Н. Аналогічно визначені координати порядків інтерференційних смуг вздовж радіуса, який виходив із вершини тріщини під кутом $\theta = 0^\circ$ (рис. 4, б).

Використовуючи рівняння (6) і (9) за величинами m і r обчислювали значення $K_I(t)$ і $K_{II}(t)$ для моментів часу $t = 0, 10, 30, 60$ хв (рис. 5). Для розв'язку нелінійних рівнянь (6) і (9) використовували процедуру ітерацій за методом Ньютона-Рафсона у поєднанні з методом найменших квадратів.

Аналіз поверхні руйнування показав, що під час повільного докритичного росту тріщини в пластинах композитних матеріалів біля вершини тріщини утворюється і зростає разом з нею зона попереднього руйнування, яка має вигляд довгої клиновидної області у напрямку продовження тріщини. Область містить в собі деяку частину зруйнованих волокон, а її береги пов'язані незруйнованими армуючими волокнами. Такий характер руйнування є подібний до того, що спостерігається в лінійних полімерах, де виникає структура крайової зони схожа на "тріщини срібла"

Досліджено розвиток напружень біля тріщин, які розташовані на контурі отвору в ортотропній в'язкопружній пластині і показано, що має місце залежність КІН від відношення довжини тріщини до радіусу отвору.

Виразимо напруження $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ в плоскому ортотропному тілі через функції напружень $\chi(\lambda_1), f(\lambda_2)$.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -s_1^2 \operatorname{Re} \chi'(\lambda_1) - s_2^2 \operatorname{Re} f'(\lambda_2), \quad \sigma_{yy} = \operatorname{Re} \chi'(\lambda_1) + \operatorname{Re} f'(\lambda_2), \\ \tau_{xy} &= -s_1 \operatorname{Im} \chi'(\lambda_1) - s_2 \operatorname{Im} f'(\lambda_2),\end{aligned}\quad (10)$$

Таблиця

Функції: повзучості $\psi_{ij}(t) \cdot 10^{-4}, (\text{МПа})^{-1}$; оптичної повзучості $F_{ij}(t)$, смуга / МПа см. Параметри $\xi_j(t)$

$t, \text{хв}$	0	10	20	30	40	50	60
$\Psi_{11}(t)$	2,42	2,48	2,57	2,65	2,71	2,75	2,77
$\Psi_{22}(t)$	3,76	3,88	4,10	4,29	4,33	4,40	4,49
$\Psi_{12}(t)$	-1,02	-1,06	-1,10	-1,14	-1,16	-1,18	-1,21
$\Psi_{66}(t)$	11,98	12,71	13,51	14,12	14,63	15,16	15,51
$\Psi_1(t)$	1,89	1,93	1,98	2,00	2,08	2,09	2,10
$\Psi_2(t)$	0,67	0,65	0,64	0,63	0,63	0,62	0,61
$F_{11}(t)$	0,62	0,63	0,64	0,65	0,65	0,65	0,65
$F_{22}(t)$	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,94	0,94
$F_{12}(t)$	0,88	0,94	0,97	0,99	100	1,03	1,04

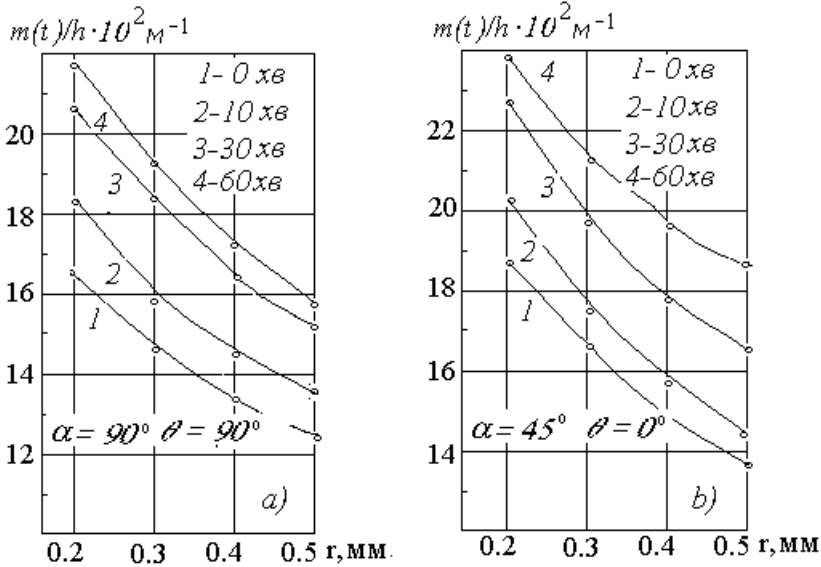


Рис. 4. Зміна відношення $m(t)/h$ вздовж радіуса r для моменту часу $t = 0, 10, 30, 60$ хв : а) при розтязі моделі під кутом $\alpha=90^\circ$ до тріщини ($\theta = 90^\circ$); б) під кутом $\alpha=45^\circ$ до тріщини ($\theta=0^\circ$)

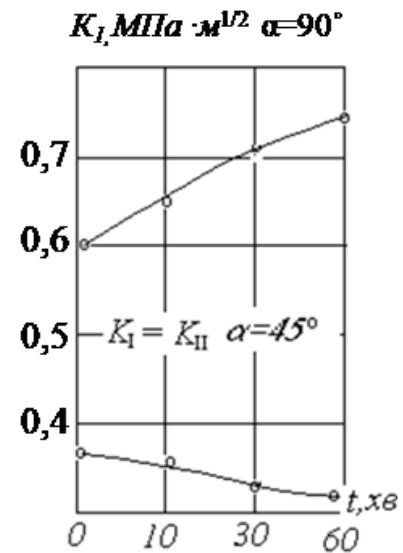


Рис. 5. Зміна коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I і K_{II} у часі

де $\lambda_j = x + is_j y$, $is_j = \mu_j$ ($j=1,2$), μ_j – комплексні параметри – корені характеристичного рівняння. Прийmemo, що:

$$\chi'(\lambda_1) = \frac{M_1 \lambda_1}{(\lambda_1^2 - l^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad f'(\lambda_2) = \frac{M_2 \lambda_2}{(\lambda_2^2 - l^2)^{\frac{1}{2}}}. \quad (11)$$

M_1 и M_2 визначаються з рівнянь (10) та умов на контурі тріщини:

$$M_1 = \frac{s_2 \sigma_0}{(s_2 - s_1)}, \quad M_2 = \frac{s_1 \sigma_0}{(s_2 - s_1)}.$$

Введемо у вершині тріщини локальну систему координат $\xi = x - l$, $f = y$, а також полярну (радіус r і кут θ) і позначимо $\zeta_j = \lambda_j - l = \xi + is_j f$.

В цьому випадку з рівнянь (11) отримаємо:

$$\chi'(\zeta_1) = \frac{M_1(\zeta_1 + l)}{(2l\zeta_1)^{\frac{1}{2}}} \left(1 + \frac{\zeta_1}{2l}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad f'(\zeta_2) = \frac{M_2(\zeta_2 + l)}{(2l\zeta_2)^{\frac{1}{2}}} \left(1 + \frac{\zeta_2}{2l}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Оскільки при $\zeta_j < 2l$ справедливе рівняння

$$\left(1 + \frac{\zeta_j}{2l}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{\zeta_j}{2l}\right)^n, \quad \text{де } C_n = (-1)^n \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2n)},$$

то формули (12) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}\chi'(\zeta_1) &= M_1 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\zeta_1}{2l} \right)^{-\frac{1}{2}} + \left(\frac{\zeta_1}{2l} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{\zeta_1}{2l} \right)^n \right], \\ f'(\zeta_2) &= M_2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\zeta_2}{2l} \right)^{-\frac{1}{2}} + \left(\frac{\zeta_2}{2l} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{\zeta_2}{2l} \right)^n \right].\end{aligned}\quad (13)$$

Виразимо комплексне число $\zeta_j = \xi + is_j f = r(\cos \theta + is_j \sin \theta)$ в тригонометричній формі: $\zeta_j = r p_j (\cos \varphi_j + i \sin \varphi_j)$, де $\rho_j^2 = (\cos^2 \theta + s_j^2 \sin^2 \theta)$, $\varphi_j = \arctg s_j \tan \theta$. Обчисливши дійсну Re і уявну Im частини функцій $\chi'(\zeta_1)$, $f'(\zeta_2)$ і підставивши їх в (10), отримаємо вирази для напруження в околі вершини тріщини, де виконуються умови нормального відриву в ортотропній пластині:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_1 s_1 s_2}{\sqrt{\pi l}} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r}{2l} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(s_2 p_2^{-\frac{1}{2}} \cos \frac{\varphi_2}{2} - s_1 p_1^{-\frac{1}{2}} \cos \frac{\varphi_1}{2} \right) + \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{1}{2}} \left(s_2 n_2^{\frac{1}{2}} - s_1 n_1^{\frac{1}{2}} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{r}{2l} \right)^{(n-\frac{1}{2})} \left[\left(s_2 n_2^{(n-\frac{1}{2})} - s_1 n_1^{(n-\frac{1}{2})} \right) + 2 \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{3}{2}} \left(s_2 n_2^{(n+\frac{1}{2})} - s_1 n_1^{(n+\frac{1}{2})} \right) \right] \right\} + \sigma_{0x}, \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_1}{\sqrt{\pi l} (s_2 - s_1)} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r}{2l} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(s_2 p_1^{-\frac{1}{2}} \cos \frac{\varphi_1}{2} - s_1 p_2^{-\frac{1}{2}} \cos \frac{\varphi_2}{2} \right) + \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{1}{2}} \left(s_2 n_1^{\frac{1}{2}} - s_1 n_2^{\frac{1}{2}} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{r}{2l} \right)^{(n-\frac{1}{2})} \left[\left(s_2 n_1^{(n-\frac{1}{2})} - s_1 n_2^{(n-\frac{1}{2})} \right) + 2 \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{3}{2}} \left(s_1 n_2^{(n+\frac{1}{2})} - s_2 n_1^{(n+\frac{1}{2})} \right) \right] \right\}, \\ \tau_{xy} &= \frac{K_1 s_1 s_2}{\sqrt{\pi l} (s_2 - s_1)} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r}{2l} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(p_1^{-\frac{1}{2}} \sin \frac{\varphi_1}{2} - p_2^{-\frac{1}{2}} \sin \frac{\varphi_2}{2} \right) + \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{1}{2}} \left(P_2^{\frac{1}{2}} - P_1^{\frac{1}{2}} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{r}{2l} \right)^{(n-\frac{1}{2})} \left[\left(P_2^{(n-\frac{1}{2})} - P_1^{(n-\frac{1}{2})} \right) + 2 \left(\frac{r}{2l} \right)^{\frac{3}{2}} \left(P_2^{(n+\frac{1}{2})} - P_1^{(n+\frac{1}{2})} \right) \right] \right\},\end{aligned}\quad (14)$$

де $K_1 = \sigma_0 \sqrt{\pi l}$, $n_j^k = p_j^k \cos k \varphi_j$, $P_j^k = p_j^k \sin k \varphi_j$ ($j = 1, 2$), k – показник степеня n_j і P_j .

Спільне розв'язання рівнянь ортотропної фотопружності і механіки руйнування тіл з тріщинами надають можливість отримати співвідношення зв'язку для величин m і K .

Для даного випадку рівняння ортотропної фотопружності набере вигляду:

$$\frac{m}{h} = \sqrt{\left(P_{22} \sigma_{yy} - P_{11} \sigma_{xx} \right)^2 + \left(2 P_{12} \tau_{xy} \right)^2}, \quad (15)$$

де P_{ij} ($i, j = 1, 2$) – функції оптичної повзучості; h – товщина пластини.

Подамо (15) в скороченому вигляді:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= K_I A_{11}(s_1, s_2, c, r, \theta) + \sigma_{0x}, \\ \sigma_{yy} &= K_I B_{11}(s_1, s_2, c, r, \theta), \\ \tau_{xy} &= K_I C_{11}(s_1, s_2, c, r, \theta).\end{aligned}\quad (16)$$

де A_{11} , B_{11} , C_{11} – множники при K_I в рівняннях (14).

Підставивши (16) в (15), знайдемо:

$$\left(\frac{m}{h}\right)^2 = K_I^2 \left(P_{11}^2 A_{11}^2 + P_{22}^2 B_{22}^2 - 2P_{11} A_{11} P_{22} B_{11} + 4P_{12}^2 C_{12}^2 \right) + 2K_I \sigma_{0x} \left(P_{11} A_{11}^2 - P_{11} P_{22} B_{11} \right) + P_{11}^2 \sigma_{0x}^2. \quad (17)$$

Експериментальні дослідження проводилося на зразках пластин з оптично чутливих волоконних композитів на основі епоксидної смоли ЕД- 20, затвердженої поліетиленполіаміном, і в якості армуючого елементу в яких було скловолокно. Досліджували зразки у вигляді пластин з круговими отворами радіусом R і симетричними тріщинами завдовжки $2l$, що орієнтовані за напрямком горизонтального діаметру отвору, співпадаючого з головним напрямом ортотропії $E_x > E_y$. Пластини навантажували постійними розтягуючими зусиллями, які викликали напруження $\sigma_0 = 6,0$ МПа, перпендикулярно до поверхні тріщин.

Розглянуто два варіанти зразків: 1) зразки з постійним діаметром отвору $2R$ і різною довжиною тріщин $2l$; 2) з різними діаметрами отворів і однією і тією ж довжиною тріщини. Всі пластини мали ширину 40 мм і товщину 3 мм.

Після навантаження пластин через певні інтервали часу фотографувалися картини інтерференційних смуг. Координати порядків смуг уздовж радіусу r , що виходить з вершини тріщини під кутом θ , визначали на компараторі КМ - 6.

В результаті досліджень отримали залежності між КІН і відношеннями l/R та часом (рис. 6, рис. 7).

У четвертому розділі застосовано поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків із геометричними концентраторами.

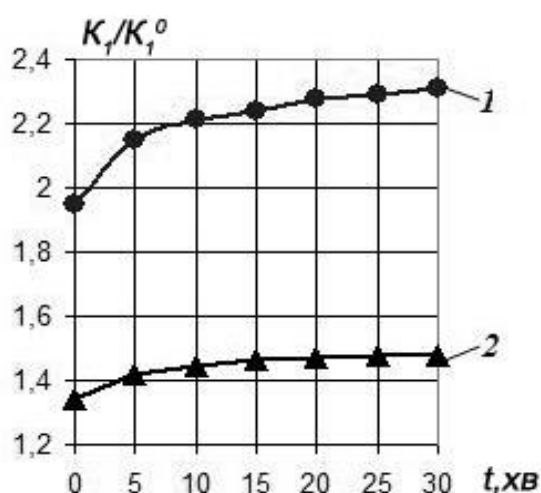


Рис. 7. Значення безрозмірного КІН $K_I^* = K_I/K_I^0$ для деяких моментів часу і параметрів l/R : (1) – для $l/R=0,42$, (2) – $l/R=1,16$

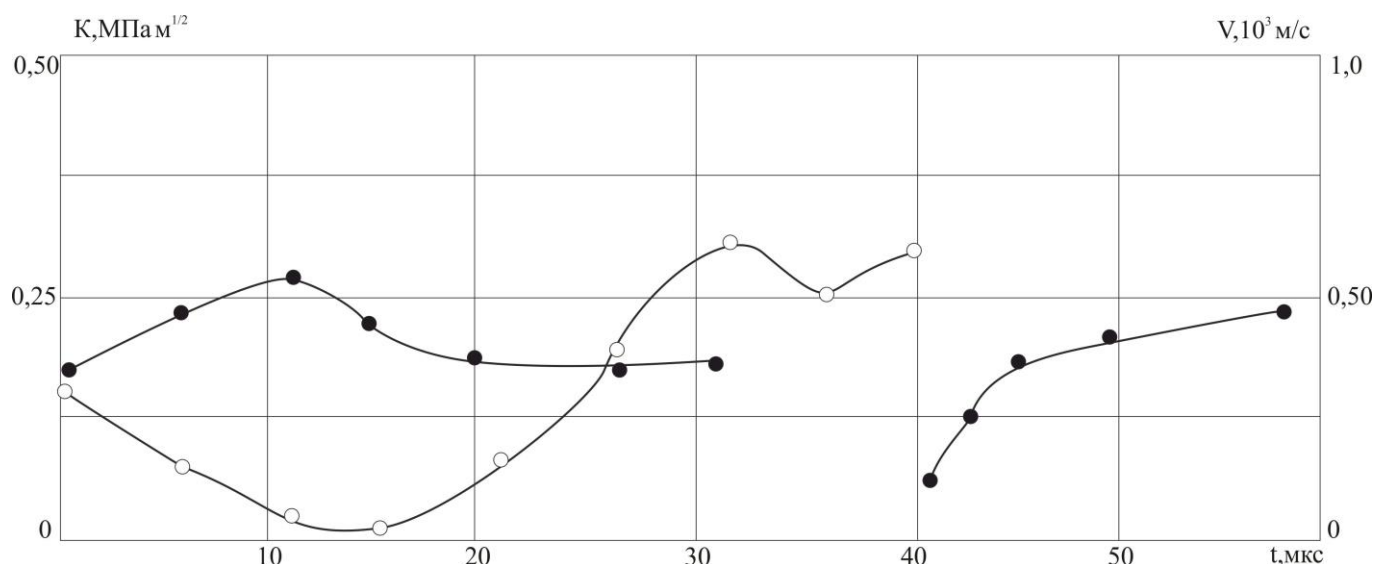


Рис. 8. Зміна швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (\circ) і коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ (\bullet) від часу в зразку з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною

Одержано величини КІН для тріщин поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні (рис. 8).

У п'ятому розділі досліджено граничний стан деяких конструктивних елементів із прозорих композитів (склопластиків), які містять геометричні концентратори. Розглянуто руйнування ортотропних пластин із круговим та еліптичним отворами та тріщинами біля отворів при імпульсному навантаженні. Геометричні розміри зразків були однаковими та відрізнялися розміщенням тріщин та отворів (рис. 9, рис. 10, рис. 11, рис. 12).

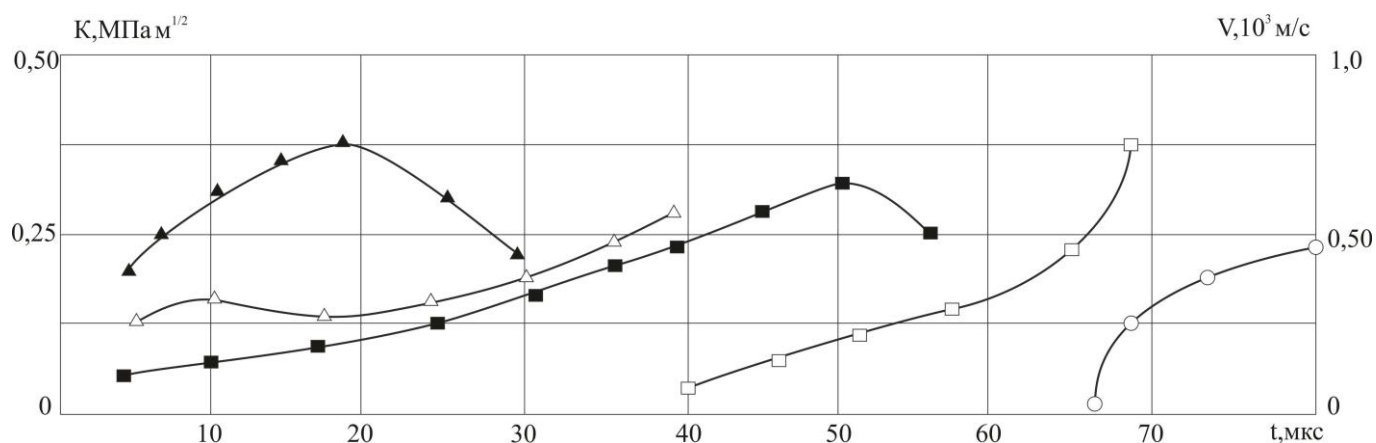


Рис. 9. Зміна швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (Δ , \square , \circ) і $K(t)$ (\blacktriangle , \blacksquare) в часі у зразку з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною

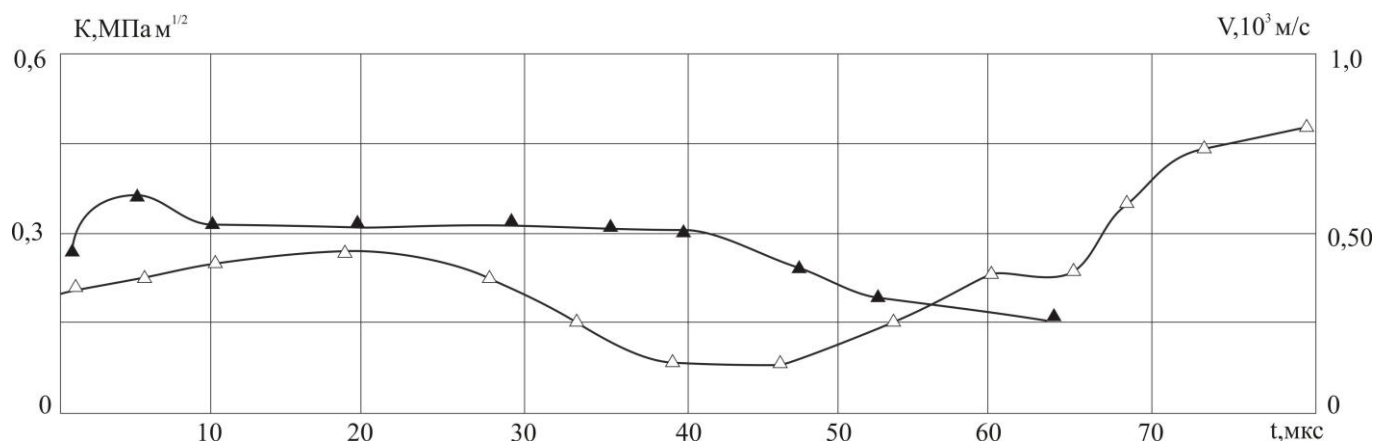


Рис. 10. Залежність швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (Δ) і $K(t)$ (\blacktriangle) в часі у зразку з центральним круговим отвором і двома контурними тріщинами

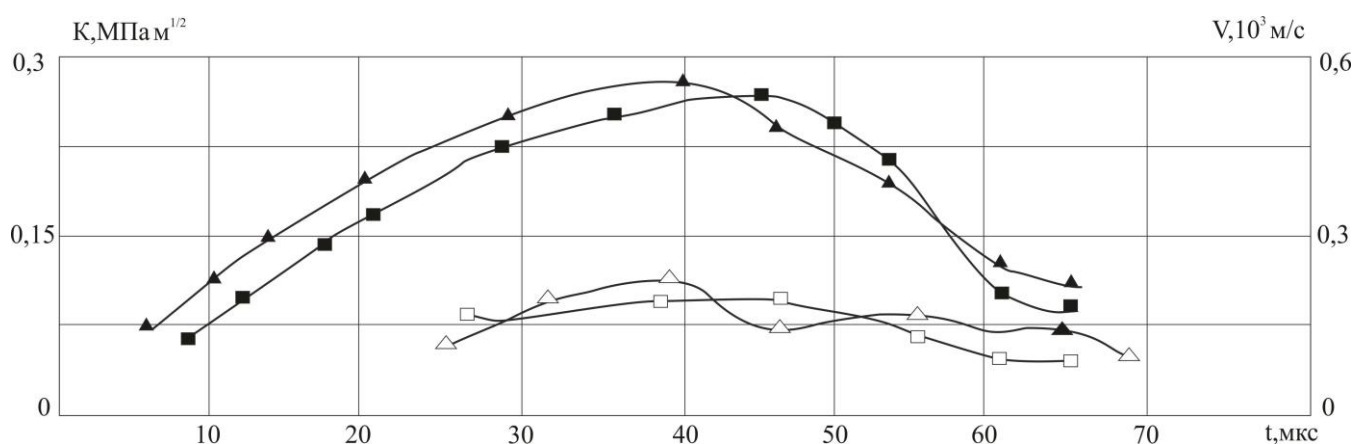


Рис. 11. Залежності $V(t)$ (\square, Δ) і $K(t)$ ($\blacktriangle, \blacksquare$) в часі у зразку з вертикально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

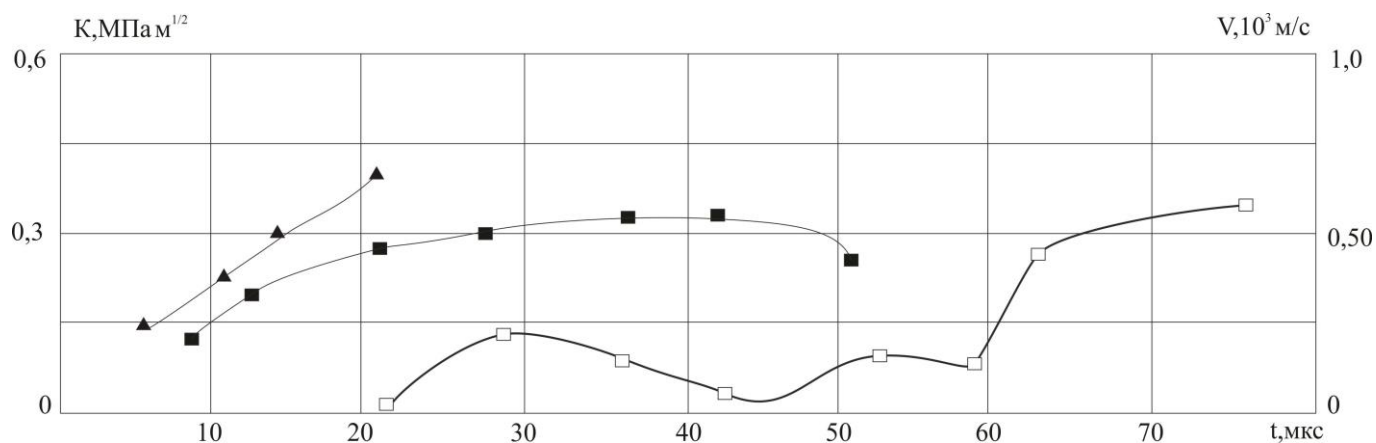


Рис. 12. Залежності $V(t)$ (\square) і $K(t)$ ($\blacktriangle, \blacksquare$) в часі у зразку з горизонтально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

Помічена суттєва різниця між явищами руйнування при імпульсних навантаженнях і статичних. При імпульсних навантаженнях не можуть існувати надто локалізовані перехідні напруження й деформації тіл, так як у цьому випадку

руйнування можуть виникати в одній частині моделі зовсім незалежно від того, що відбувається в усьому його об'ємі.

Одержано чисельні дані руйнування елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори.

ВИСНОВКИ

Результатом виконаної роботи став розвиток поляризаційно-оптичного методу, що дало можливість підвищити його ефективність та функціональні можливості для визначення напружено-деформованого та граничного станів склопластиків.

1. Розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами. Метод ефективно застосовувати для експрес-аналізу НДС елементів із склопластиків з концентраторами. Точність методу до 5%.

2. Досліджено величини коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин у в'язкопружних ортотропних композитах (склопластиках). При розтягу пластини під кутом $\alpha = 90^\circ$ до тріщини максимальне значення КІН складає $K_I = 0,73 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а при розтягу під кутом $\alpha = 45^\circ$ – максимальне значення $K_I = 0,37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

3. Розвинуто поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків з геометричними концентраторами.

4. Одержано величини КІН для тріщин поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні. Максимальні значення КІН становлять: для зразку з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною $K_I = 0,29 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; для пластини з центральним еліптичним отвором та ізольованою тріщиною $K_I = 0,37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; для зразку з центральним круговим отвором і двома контурними тріщинами $K_I = 0,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; для пластини з вертикально розміщеними двома круговими отворами, що мають контурні тріщини $K_I = 0,28 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; для зразка з горизонтально розміщеними двома круговими отворами, що мають контурні тріщини $K_I = 0,40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

5. Одержано залежності $V(t)$ і $K(t)$ в часі при руйнуванні елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори. Величини середньої швидкості вершини тріщини становлять: для зразка з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною $V = 320\text{-}340$ (м/с); для пластини з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною $V = 340\text{-}350$ (м/с). Значення максимальної швидкості для зразку з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною досягають $V = 600\text{-}610$ (м/с), а для пластини з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною – $V = 570\text{-}750$ (м/с).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Підгурський М. Напружений стан пластин із склопластику з отвором та тріщиною при імпульсному навантаженні / М. Підгурський; Ю. Рудяк; Л. Войтович; О. Кушак // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2016. № 4(84). С. 40–47.

2. Voitovich, L. V.; Malezhik, M. P.; Chernyshenko, I. S. Photoelastic modeling of the fracture of viscoelastic orthotropic plates with a crack. *International Applied Mechanics* vol. 46 issue 6 November 2010. p. 677–682.
3. Voitovich, L. V.; Malezhik, M. P.; Chernyshenko, I. S. Stress state around cracks on the boundary of a hole in a photoelastic orthotropic plate under creep. *International Applied Mechanics* vol. 46 issue 11 April 2011. p. 1268–1274.
4. Malezhik M. P., Voitovich L. V. Photoelastic Modeling of Problems in the Mechanics of Orthotropic Bodies // *International Applied Mechanics: Volume 50, Issue 6 (2014)*, p. 699–705.
5. N. V. Olali, L. V. Voitovich, N. N. Zazimko, M. P. Malezhik, Modeling Creep Processes in Aging Polymers // *International Applied Mechanics* vol. 52 issue 2 March 2016, p. 176–181.
6. Войтович Л. В. Дослідження напружено-деформованого стану диску компресора турбіни методом фото пружності / Л. В. Войтович, В. В. Наконечний // *Вісник Київського університету. Вип. 5. Серія. Фізико-математичні науки. Київ, 2003. С. 27–30.*
7. Войтович Л. В. Напружено-деформований стан круглої пластинки з ексцентричними круговими отворами / Л. В. Войтович, В. В. Наконечний // *Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал Машинознавство, Львів. № 5. 2005. С. 49–52.*
8. Войтович Л. В. Розподіл напружень біля підкріпленого кругового отвору в тонкій пластинці при розтягу / Л. В. Войтович, В. В. Наконечний // *Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3(39) Частина 2. Рівне, 2007. С. 41–44.*
9. Войтович Л. В. Концентрація напружень біля отворів в круглій пластинці стиснутій вздовж діаметра / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, В. В. Наконечний // *Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3(47) Частина 2. Рівне, 2009. С. 385–390.*
10. Войтович Л. В. Фотопружне моделювання нестационарного поля напружень поблизу вершини тріщини в анізотропній пластині / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, В. В. Наконечний // *Матеріали ХІХ Международной научной школы им. Академика С.А. Христиановича. Крым, Алушта, 21-27 сентября 2009. С. 81–85.*
11. Войтович Л. В. Дослідження нестационарних напружень в ортотропній пластині з тріщиною / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, В. В. Наконечний // *Матеріали конференції молодих учених «ПІДСТРИГАЧІВСЬКІ ЧИТАННЯ – 2010» Львів 25-26 травня 2010 року <http://www.iapmm.lviv.ua/chyt2010/materials/pc2010-01-VMN-07.pdf>*
12. Войтович Л. В. Фотопружне моделювання задач механіки руйнування ортотропних лінійно-в'язкопружних пластин з тріщинами / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, В. В. Наконечний // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів : Інститут прикладних проблем механіки ім. Я. С. Підстригача НАН України. 2010. С. 357–359.*
13. Войтович Л. В. Напружений стан біля тріщини в ортотропній пластині в умовах повзучості / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, В. В. Наконечний // *Матеріали ХХ Международной научной школы “Деформирование и разрушение*

- материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках.” Симферополь : Таврический нац. ун-т., 2010. С. 103–105.
14. Войтович Л. В. Перерахунок напружень з фотов'язкопружних ортотропних моделей на натурне тіло / Л. В. Войтович // Матеріали IV Конференція молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача. / Тези доповідей. НАН України. Львів, 2011. С. 21–22.
 15. Войтович Л. В. Перехід від напружень у фотов'язкопружній ортотропній моделі до напружень в натурному тілі / Л. В. Войтович, М. П. Малежик // Матеріали XXI Международной научной школы им. Академика С. А. Христиановича. Крым, Алушта, 19-25 сентября 2011. С. 88–91.
 16. Войтович Л. В. Моделювання довготривалого руйнування фотов'язкопружних ортотропних пластин з тріщиною / Л. В. Войтович, М. П. Малежик // Матеріали XXII Международной научной школы им. Академика С. А. Христиановича. Крым, Алушта, 17-23 сентября 2012. С. 104–106.
 17. Войтович Л. В. Дослідження напруженого стану біля тріщини на контурі отвору у в'язкопружній ортотропній пластині / Л. В. Войтович, М. П. Малежик, Г. П. Шеремет // Матеріали XXIII Международной научной школы им. Академика С. А. Христиановича. Симферополь, Таврический нац. ун-т., 2013. С. 79–82.
 18. Підгурський М. І. Граничний стан пластин із склопластику з отвором та тріщиною при динамічному навантаженні / М. І. Підгурський, Ю. А. Рудяк, Л. В. Войтович // Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Миколаїв, Україна, 22-24 вересня 2016 р. С. 214–216.

АНОТАЦІЯ

Войтович Л.В. Дослідження напружено-деформованого та граничного станів прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами поляризаційно-оптичним методом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукового завдання – підвищення ефективності та функціональних можливостей поляризаційно-оптичного методу шляхом його розвитку для визначення напружено-деформованого та граничного станів склопластиків. На основі розгляду взаємозв'язку між механічними та оптичними характеристиками застосовано робочі формули для коректного проведення досліджень напружень у в'язкопружних конструктивно-ортотропних середовищах поляризаційно-оптичним методом, які використовують взаємозв'язок між механічними і оптичними характеристиками. Розроблено методику визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу вершини

тріщини в в'язкопружних структурно-ортотропних пластинах, що знаходяться в умовах повзучості за результатами поляризаційно-оптичних вимірів. Розроблено методику та застосовано формули визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин у прозорому композиті (склопластику) за даними фотопружних вимірів. Одержано величини КІН для тріщин у склопластику, які знаходяться поруч із отворами та виходять на їх контур. Застосовано поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків із геометричними концентраторами.

Одержано величини КІН для тріщини поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні. Отримано залежності швидкості руху тріщини і коефіцієнта інтенсивності напружень в часі при руйнування елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори.

Ключові слова: коефіцієнт інтенсивності напружень, склопластик, фотов'язкопружність, конструктивно-ортотропне середовище, тріщина.

АННОТАЦИЯ

Войтович Л.В. Исследование напряженно-деформированного и предельного состояний прозрачных композитов (стеклопластиков) с геометрическими концентраторами поляризационно-оптическим методом. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2017.

Диссертация посвящена решению научного задания – повышение эффективности и функциональных возможностей поляризационно-оптического метода путем его развития для определения напряженно-деформированного и предельного состояний стеклопластиков. На основании рассмотрения взаимосвязи между механическими и оптическими характеристиками применены рабочие формулы для корректного проведения исследований напряжений в вязкоупругих конструктивно-ортотропных средах поляризационно-оптическим методом, которые используют взаимосвязь между механическими и оптическими характеристиками. Разработана методика определения коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершины трещины в вязкоупругих структурно-анизотропных пластинах, находящихся в условиях ползучести по результатам поляризационно-оптических измерений. Анализ поверхности разрушения показал, что во время медленного докритического роста трещины в пластинах стеклопластиков у вершины трещины образуется и растет вместе с ней зона предварительного разрушения, которая имеет вид длинной клиновидной области в направлении продолжения трещины. Область содержит в себе некоторую часть разрушенных волокон, а ее берега связанные неразрушенными армирующими волокнами. Разработана методика и использованы формулы определения коэффициентов интенсивности напряжений для трещин в прозрачном композите (стеклопластике) по данным фотоупругих измерений. Получены зависимости величины КИН между соотношениями длины трещины и радиуса отверстия для трещин в стеклопластиках, которые находятся рядом с

отверстиями и выходят на их контур. Применен поляризационно-оптический метод для исследования динамического напряженного состояния стеклопластиков с геометрическими концентраторами.

Получены величины КИН для вершины трещины в пластине стеклопластика при импульсной нагрузке: для образца с центральным круговым (эллиптическим) отверстием и изолированной трещиной; для пластины с центральным круговым отверстием и двумя контурными трещинами; для образца с вертикально (горизонтально) расположенными двумя круговыми отверстиями, имеющими контурные трещины. Получены зависимости скорости движения трещины и коэффициента интенсивности напряжений во времени, при разрушении элементов конструкций из стеклопластика, которые содержат геометрические концентраторы.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, стеклопластик, фотовязкоупругость, конструктивно-ортотропная среда, трещина.

ABSTRACT

Voitovich L.V. A study of stress-strain state and limit transparent composites (GRP) with the geometric concentrators polarization-optical method. – Manuscript.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences (specialty 01.02.04 – mechanics of deformable solid). – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2017.

This thesis devoted to the solution of an important scientific task such as increasing the efficiency and functional capabilities of the polarization-optical method through its development for the determination of stress-strain and boundary states of fiberglass plastics. Based on the consideration of the interconnection between mechanical and optical characteristics is proposed the formulas for the correct conducting of stress studies in viscoelastic constructive-orthotropic media of POM. Also, based on the results of polarization-optical measurements are developed methods for determining the stress intensity factors near the crack tip in viscoelastic structurally anisotropic plates under creep conditions. The method and the proposed formula for determining stress intensity factors for cracks in transparent composite (fiberglass) according to polarization-optical measurements. SIF values are obtained for cracks in the fiberglass which close to the hole and get out of their path. Polarization-optical method for the study of the dynamic stress state of fiberglass geometric concentrators is modified.

SIF values are obtained for cracks near the central hole in the plate of fiberglass under pulsed load. Crack propagation speed and the stress intensity factor in time for the destruction of structural elements made of fiberglass, which contain geometric concentrators dependencies are obtained.

Keywords: stress intensity factor, fiberglass, photoconductivity, structural-orthotropic medium, crack.