

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТІВ ІЗ ГЕОМЕТРИЧНИМИ
КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМмз-21

Войтович Леонід Володимирович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Зубовецька Наталія Тарасівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії
Кафедра прикладної механіки та мехатроніки
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 131 Прикладна механіка
Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Р. Редько
“ ____ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ Войтовичу Леоніду Володимировичу (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Дослідження граничних станів елементів конструкції верстатів із геометричними концентраторами при динамічних навантаженнях*

Керівник роботи: *Зубовецька Наталія Тарасівна, к.т.н., доцент*, затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» грудня 2023 р. № 452/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: 1.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: *підвищення ефективності та функціональних можливостей поляризаційно-оптичного методу для визначення напружено-деформованого та граничного станів елементів конструкції верстатів із склопластиків, відгуки підприємств про роботу обладнання, результати аналізу конструктивних і функціональних особливостей верстатів.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Зміст. Вступ. 1. Експериментальні методики дослідження прозорих композитів (склопластиків). 2. Застосування поляризаційно-оптичного методу для дослідження динамічного напруженого стану прозорих композитів (склопластиків). 3. Граничний стан деяких конструктивних елементів із прозорих композитів (склопластиків), які містять геометричні концентратори. Висновки і пропозиції. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. Назва роботи, мета та задачі досліджень – 1 ф.А1; 2. Зміна швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (\circ) і коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ - 1 ф.А1. 3. Зміна коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ ($\blacktriangle, \blacksquare$) і швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (\square, \circ) в часі - 1 ф.А1. 4. Зміна коефіцієнта інтенсивності напружень і швидкості руху вершини тріщини $K(t)$ (\blacktriangle) і $V(t)$ (\triangle) в часі - 1 ф.А1; 5. Висновки та пропозиції – 1 ф. А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

03.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз завдання та обґрунтування напрямків роботи</i>	15.09.24	
2.	<i>Експериментальні методика дослідження прозорих композитів (склопластиків)</i>	05.10.24	
3.	<i>Застосування поляризаційно-оптичного методу для дослідження динамічного напруженого стану прозорих композитів (склопластиків)</i>	25.10.24	
4.	<i>Граничний стан деяких конструктивних елементів із прозорих композитів (склопластиків), які містять геометричні концентратори</i>	10.11.24	
5.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	20.11.24	
6.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	25.11.24	
7.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	01.12.24	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Войтович Л.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Зубовецька Н.Т.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Войтович Л.В. Дослідження граничних станів елементів конструкції верстатів із геометричними концентраторами при динамічних навантаженнях. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 3 розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел і додатків.

Робота присвячена підвищенню ефективності та функціональних можливостей поляризаційно-оптичного методу шляхом його розвитку для визначення напружено-деформованого та граничного станів елементів конструкції верстатів із склопластиків. Застосовано поляризаційно-оптичний метод для дослідження динамічного напруженого стану склопластиків із геометричними концентраторами. Одержано величини коефіцієнта інтенсивності напружень для тріщини поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні. Отримано залежності швидкості руху тріщини і коефіцієнта інтенсивності напружень в часі при руйнуванні елементів конструкції верстатів із склопластику, які містять геометричні концентратори.

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

ABSTRACT

Voytovych L.V. Research of limit states of structural elements of machine tools with geometric concentrators under dynamic loads. Manuscript.

Master's qualification work OP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

Master's qualification work consists of an introduction, 3 chapters, conclusions and proposals, a list of used sources and appendices.

The work is devoted to increasing the efficiency and functionality of the polarization-optical method by developing it to determine the stress-strain and limit states of structural elements of fiberglass machine tools. The polarization-optical method was applied to study the dynamic stress state of fiberglass with geometric concentrators. The values of the stress intensity coefficient for a crack near the central hole in a fiberglass plate under pulse loading were obtained. The dependences of the crack velocity and the stress intensity factor on time during the failure of structural elements of fiberglass machine tools containing geometric concentrators were obtained.

Keywords: stress intensity factor, fiberglass, structurally orthotropic medium, crack.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЗОРИХ КОМПОЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ).....	11
1.1. Матеріали для дослідження	11
1.1.1. Епоксидна смола, як матриця прозорого композиту (склопластика).....	11
1.1.2. Технологія створення прозорого композиту (склопластика).....	12
1.2. Створення тріщин у матриці композиту	17
1.3. Прилади для дослідження динамічного навантаження прозорого композиту (склопластика).....	18
1.4. Основні теорії граничного стану.....	21
1.5. Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРОЗОРИХ КОМПОЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ)	24
2.1. Основні співвідношення динамічної фотопружності ортотропних тіл ..	24
2.2. Дослідження динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень методом фотопружності	27
2.3. Напружений стан пластин із центральним круговим отвором та тріщиною при імпульсному навантаженні	33
2.4. Висновки до розділу 4.....	38
РОЗДІЛ 3. ГРАНИЧНИЙ СТАН ДЕЯКИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ПРОЗОРИХ КОМПОЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ), ЯКІ МІСТЯТЬ ГЕОМЕТРИЧНІ КОНЦЕНТРАТОРИ.....	39
3.1. Руйнування ортотропних пластин із круговим та еліптичним отворами та тріщинами біля отворів при імпульсному навантаженні.....	40
3.2. Руйнування ортотропних пластин із центральним круговим отвором та двома симетричними тріщинами, які виходять на контур, при імпульсному навантаженні.....	43

3.3. Руйнування ортотропних пластин, які містять два отвори з радіальними тріщинами, що виходять на контури отворів, при їх вертикальному (вздовж навантаження) розміщенні при імпульсному навантаженні.....	44
3.4. Руйнування ортотропних пластин, які містять два отвори з радіальними тріщинами, що виходять на контур, при горизонтальному (нормальне навантаження) розміщенні отворів при імпульсному навантаженні.....	46
3.5. Висновки до розділу 3.....	49
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасній техніці та у верстатобудуванні в останні роки намітилась тенденція широкого використання неметалічних матеріалів, які не тільки є заміниками металів, але в деяких випадках застосовуються як незамінні 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.

Одним із основних експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла (МДТТ) 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 обробки експериментальної інформації, а лише за картиною ізохроматичних смуг. Наряду 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.

Мета. Підвищення ефективності та функціональної можливості поляризаційно-оптичного методу шляхом його розвитку для визначення напружено-деформованого та граничного станів елементів конструкції верстатів із геометричними концентраторами виготовлених з склопластиків при динамічних навантаженнях.

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

Предмет дослідження. Напружено-деформований та граничний стан прозорих композитів (склопластиків) із геометричними концентраторами при довготривалому та динамічному навантаженнях.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження та використання аналітичного апарату базуються на положеннях механіки суцільного середовища,

в'язкопружності анізотропних тіл, механіки руйнування, мікрозональної та динамічної фотопружності.

Зразки із прозорих композитів (склопластиків) досліджувались поляризаційно-оптичним методом на координатно-синхронних поляриметрах КСП-5 та КСП-7, 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 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 одержано чисельні дані руйнування елементів конструкцій із склопластику, що містять геометричні концентратори.

Практичне значення отриманих результатів.

- 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.

Особистий внесок магістранта. Усі результати, наведені у кваліфікаційній роботі магістра, отримані самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі: [62] – автор приймав участь у дослідженнях і обговоренні результатів. У роботах [63-64] автору належить ідея, участь в експерименті й аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися на: міжнародній науково-практичній конференції “Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних і фізико-математичних наук”(Миколаїв, 2016), . The IV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of practice and science and methods of their solution» (Milan, Italy. 2022), IV Всеукраїнській науково-

технічній інтернет-конференції “Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем” (Рівне. 2023):

Публікації. За результатами роботи опубліковано 3 наукових праць, з них 1 – стаття, 2 – тези конференцій [63,64]. 1 стаття [62] опублікована у виданнях України, які включені до міжнародної науково метричної бази (SCOPUS).

РОЗДІЛ 1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЗОРИХ КОМПОЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ)

В наш час в промисловості перетавожає тенденція більш широкого використання нових матеріалів, серед яких багато є з в'язкопружними властивостями. Основою більшості таких матеріалів є полімери головним чином синтетичні.

1.1. Матеріали для дослідження

Для поляризаційно-оптичного дослідження напружено-деформованого стану придатність модельного матеріалу залежить від відповідності його властивостей цілій низці вимог [1]. Потрібен модельний матеріал, який за структурою і власною природою був би схожий на натурний об'єкт (склопластик). Для моделювання напружень в армованих пластмасах таким вимогам відповідає структурно ортотропний матеріал, який отриманий на основі епоксидної смоли та волокон зі скла, що вказали попередні дослідження. На створення таких матеріалів було вказано в роботах [2, 3].

1.1.1. Епоксидна смола, як матриця прозорого композиту (склопластика).

Об'єктом для дослідження є прозорі композити (склопластики). Епоксидні смоли (смоли ЕД-20М, ЕД-16М) виступають як матриці композиційних матеріалів склопластиків, які мають все ширше застосування у суднобудуванні, авіабудуванні та космічному машинобудуванні. Епоксидні смоли також можуть бути використані як самостійний конструкційний матеріал для клеєння шару триплексів, окрім цього, смоли є основою для моделювання у поляризаційно-оптичному методі, який є одним з найбільш розвинутих та дійових оптичних методів дослідної механіки. Оглянемо ключові характеристики епоксидних смол ЕД-20М, ЕД-16, котрі були використані у роботі для проведення експерименту [4].

Склад епоксидної смоли ЕД-20М вирізняється присутністю активних епоксидних груп. Епоксидної смола, це в'язка рідина, для трансформації котрої в

твердий матеріал додаються затверджувачі. Для нашого випадку – малеїновий ангідрид. Після взаємодії затверджувача з епоксидними групами, проходить їх зшивання та утворення тримірної сітки. В результаті чого створюється досить міцний матеріал з коефіцієнтом пружності I роду, що дорівнює у скловидному стані 3100-3300 МПа. Смола ЕД-20М, як і матеріал ЕД-16 це є полімери на базі епоксидних смол одностадійного затвердження. Вказані матеріали можуть використовуватись як у скловидній, так і у високо еластичній формі, можна використати при моделюванні задач механіки деформівного твердого тіла (табл. 1.1). За допомогою поляризаційно-оптичних досліджень на матеріалах ЕД-16 та ЕД-20М розв'язано досить багато технічних задач [4].

Таблиця 1.1. – Оптико-механічні характеристики епоксидних смол ЕД-20М, ЕД-16

Матеріал	Модуль пружності $E \cdot 10^3$, МПа	Границя міцності на розтяг σ^* , МПа	В'язкість руйнування, KI^* , МПа \cdot м $^{1/2}$	Коефіцієнт оптичної чутливості, $C \cdot 10^{-7}$, 1/МПа
ЕД-20М	3,2	52	1,23	4,3
ЕД-16	2,8	47	1,18	4,1

1.1.2. Технологія створення прозорого композиту (склопластика).

Методика виготовлення модельних композиційних матеріалів (склопластику) включає в себе вибір компаунда, що заливається, підготовку армуючих елементів і відпрацювання способу просочення армування зв'язуючим елементом. Суміш на основі епоксидно-діанової смоли ЕД-16 і поліетиленполіаміна (ПЕПА) придатна для виготовлення зразків невеликої маси. Тому виникла потреба розробити методику отримання матеріалу холодного затвердження, маса якого була б 500 грам і більше [5].

При виготовленні невеликих ортотропних пластин (маса компауду до 200 г.), запропоновано використовувати композицію відповідного складу: епоксидна смола ЕД-16 – 100 вагових частин, поліетиленполіамін – 8 вагових частин, дібутилфталат (ДБФ) – 5 вагових частин. ЕД-16 і ПЕПА заздалегідь нагріті до 80 – 100⁰ С, протягом 5 годин для вилучення летких низькомолекулярних домішок піддавалися вакуумуванню. Для вилучення механічних домішок компоненти окремо фільтрувалися через капроновий фільтр. Далі компаунд епоксидної смоли змішувався із пластифікатором (ДБФ), пізніше при перемішуванні додавалась ПЕПА. Композиція відстоювалась на протязі 5-10 хвилин для виходу з неї пухирців і заливалась у форму, яка складалась з металевих пластин, що розділені прокладками з розміщеною між ними рамкою із регулярно навитими волокнами зі скла Е - 2. Скляні волокна попередньо відпалювались в термошафі за температури 120⁰ С і оброблялись в ацетоні. Елементи форми, які були в контакті з компаундом, оброблялись кремнієвоорганічним покриттям К-21. Для отримання герметизації з'єднань їх змащували гелем ЦИАТИМ або покривали фторопластовою плівкою [5].

Дана методика використовувалась для виготовлення оптично чутливих пластин з масою до 200 грам. За допомогою прокладок реалізовувалась регуляція товщини пластини. Прокладки наклеювались між шарами по контуру пластинок. В залежності від кількості волокон можна одержати матеріали з різноманітною мірою ортотропії пружних властивостей [5].

При виготовленні модульного матеріалу масою біля 500 грамів були випробувані такі пластифікатори: трикрезілфталат, поліефір МГФ-9, низькомолекулярна епоксидна смола ДЕГ-1, дібутилфталат в різних вагових відношеннях. При великих вагових пропорціях смоли (20 вагових частин смоли) утворювався досить хороший матеріал [5].

Використовуючи діметилформалід, толуол, метилетилентон, ацетон можна знизити в'язкість при вмісті, меншому 5-10 вагових частин на 100 вагових частин смоли ЕД-20. Враховуючі дуже малі розміри молекул ці речовини поволі дифундують, навіть із компаунду в желеподібному стані, внаслідок чого матеріали

не можна вважати стабільними за своїми оптико-механічними характеристиками [5].

Підсумовуючи наведене вище та дослідження інших експериментаторів [6], можна стверджувати, що для подолання цього утруднення, пропонується використовувати 2,4,6 трис-(диметиламінометил) - фенол (ДМР-30) як затверджувач за кімнатної температури. ДМР-30 застосовується в більшості випадків, як ефективний прискорювач затвердження епоксидних смол, він має меншу від ПЕПА екзотермічність після завершення полімеризації, в результаті чого модельні матеріали з його використанням більш життєздатні, окрім того, ДМР-30 є низькомодульною і поліфункціональною речовиною, яка утворює компаунд з більшою щільністю зшивання, ніж ПЕПА [5].

Для виготовлення в'язучого компонента п'єзооптичних конструктивно-ортотропних матеріалів підтверджується застосування 2,4,6 трис-(диметиламінометил) - фенолу. Наступні експерименти вказали [143], що найкращим з точки зору перспектив виробництва пластин і блоків, що задовольняють вимоги поляризаційно-оптичного методу є наступний склад модельного матеріалу: 100 вагових частин епоксидно-діанової смоли ЕД-16, 5 вагових частин 2,4,6 трис-(диметиламінометил)-фенолу - ДМР-30, 5 вагових частин дібутилфталату - ДБФ [7].

Для виготовлення модельного матеріалу масою 500 грам епоксидна смола ЕД-16 попередньо проходила вакуумунізацію. Потім вона як і в попередньому випадку, перемішувалась із пластифікатором і залишалась проходити процес затвердження при температурі 70-80⁰ С. Після цього життєздатність композиції масою 500 грам зберігалась протягом 30-45 хвилин. Цього часу достатньо для виходу пухирців із всього епоксидного компаунду при допомозі вакуумування. Застосована форма була аналогічною за будовою, що була вищеописана (тільки збільшеного розміру). Протягом 24 годин при кімнатній температурі проходило затвердження, після чого форму роз'єднували та пластина нагрівалась в термічній шафі 24 години за температури 50 С [5].

Виготовлявся модельний матеріал для проведення експерименту в формі пластин розміром до 300 ×300 мм. та більше. Отриманий компаунд був без внутрішніх дефектів (пухирців, свілей, залишкових напружень). Тривалий час залишалися стабільними оптико-механічні властивості такого матеріалу при кімнатній температурі [8].

Оптичні і пружні характеристики для волокна (Е-скло) і епоксидної смоли (ЕД-16) наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. – Оптичні і пружні характеристики для волокна (Е-скло) і епоксидної смоли (ЕД-16)

Матеріали	Ціна смуги $c \times 10^{-1}$, МПа·см/смуга	$E \times 10^4$, МПа	Коеф. Пуасона
Скловолокно (Е-скло)	243,0	7,38	0,2
Епоксидна смола (ЕД-16)	34,82	0,28	0,35

В табл. 1.3 розміщені фотопружні константи композиту визначені експериментально для різних значень вмісту армуючого скловолокна.

Таблиця 1.3. – Фотопружні константи композиту визначені експериментально для різних значень вмісту армуючого скловолокна.

% волокна	$c_{11} 10^{-1}$, МПа·см/смуга (експеримент)
0	
10	88,0
17	114,0
20	124,0
24	135,8
31	152,8

Дослідження в'язкопружних характеристик отриманого матеріалу проводились акустичними методами, зокрема методом вимушених резонансних коливань. За допомогою цього методу визначили дійсну частину комплексного модуля пружності, а також тангенс кута механічних втрат ($tg \delta$) [5].

На рис.1.1 подано структурно-ортотропний матеріал, який виготовлений на основі наповнювача епоксидної матриці та полімерних сполучників і у вигляді скло-волокон. Такий матеріал, як правило, проявляє в'язкопружні властивості, що зумовлюють специфічні взаємозв'язки між напруженнями і деформаціями [5].

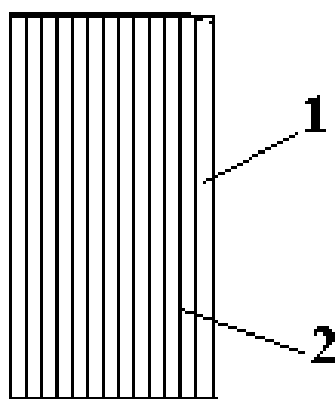


Рисунок 1.1 Модель конструктивного ортотропного матеріалу. 1 – епоксидна матриця, 2 – волокна

При дії на такий матеріал синусоїдального напруження σ , деформація ε також змінюється за відповідним законом, проте має відмінність від напруження за фазою.

$$\sigma = E^* \varepsilon \quad (1.1)$$

де : $E^* = E' (1 + i d)$ - комплексний модуль пружності;

$E' = \text{Re } E^*$ - динамічний модуль пружності, який характеризує відношення складової частини напруження, що співпадає по фазі з деформацією до величини цієї деформації;

$d = \text{tg } \delta = E''/E'$ - коефіцієнт втрат;

δ - кут зсуву фаз між напруженням і деформацією;

E'' - модуль втрат [5].

Значення коефіцієнта втрат ($\text{tg } \delta$), модуля втрат (E'') від вагових частин дибутилфталату (в.ч. ДБФ) наведені в табл.1.4.

Таблиця 1.4. – Коефіцієнт втрат ($tg\delta$), модуль втрат (E''), вагові частини дибутилфталату (в.ч. ДБФ)

ДБФ (в.ч.)	$tg\delta$	$E'' 10^2$ (МПа)
4	0,02	3,8
5	0,035	4,0
6	0,05	4,1
7	0,07	3,5
8	0,1	3,0

Залежність значення коефіцієнта втрат ($d = tg\delta$) від вагових частин дибутилфталату (в.ч. ДБФ) подано на рис. 1.2.

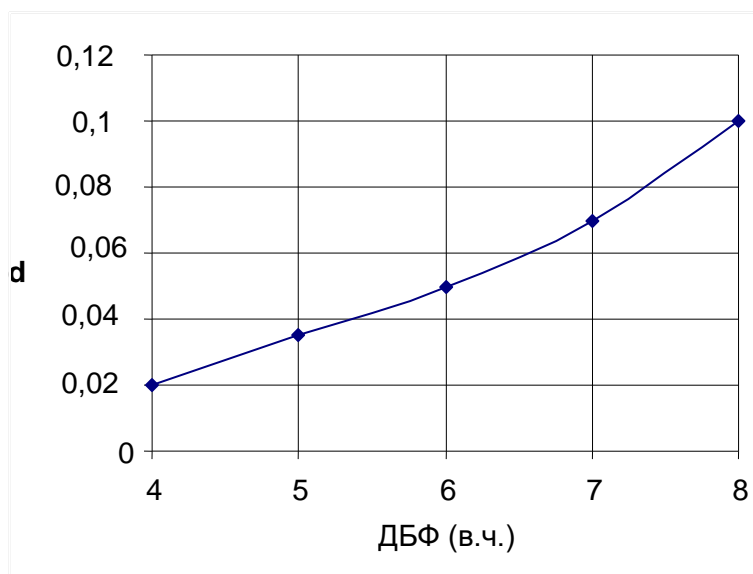


Рисунок 1.2 Залежність значення коефіцієнта втрат ($d = tg\delta$) від вагових частин дибутилфталату (в.ч. ДБФ)

1.2. Створення тріщин у матриці композиту

Тріщину імітували пропилом з радіусом закруглення вершини 0,15·мм. Після цього зразок піддавали дозованому силовому впливу і при русі вершини тріщини силовий вплив припиняли. В результаті отримували концентратор напружень наближений до ідеальної тріщини.

1.3. Прилади для дослідження динамічного навантаження прозорого композиту (склопластика)

Для експериментального дослідження хвильових полів та кінетики росту тріщин у конструктивно-анізотропних матеріалах використовується поляризаційно-динамічна установка. Блок-функціональна схема установки зображена на рис.1.3., а зовнішній вигляд на рис.1.4.

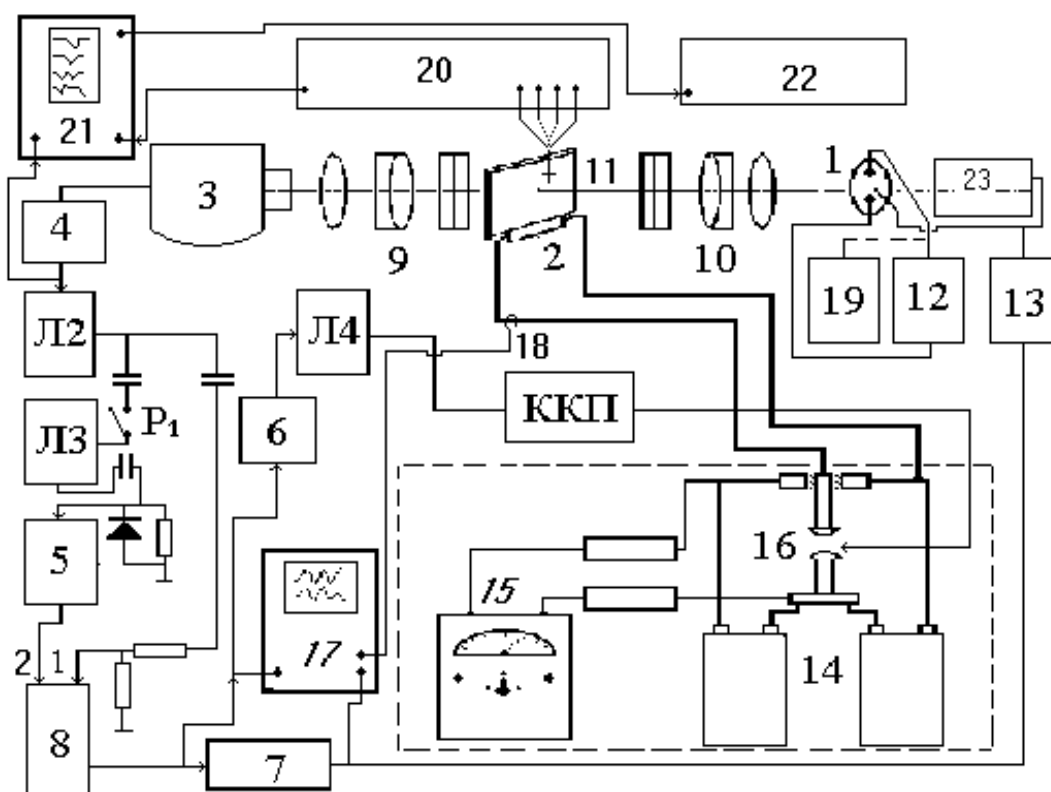


Рисунок 1.3 Блок-функціональна схема поляризаційної установки

Установка складається з імпульсної лампи (1) типу ИСШ-400-3, пристрою для імпульсного навантаження (2), фотореєстратора (3) типу СФР-1М з пультом управління (4), трьох блоків затримки (5), (6) і (7) типу Г5-15, блока автоматичного регулювання затримки (8) та системи (9) і (10) оптичних елементів. Імпульсна лампа, фотореєстратор і оптичні елементи, розміщені на одній осі, що проходить через центр зони спостереження моделі (11). Установка, також, містить у собі електроенергетичний блок (14), призначений для живлення пристрою імпульсного навантаження, розрядник (16), запам'ятовуючий осцилограф (17). Пояс Роговського

(18) призначений для вимірювання параметрів імпульсу струму в колі розрядника, а джерело високої напруги (19) для живлення імпульсної лампи (1). Джерело (12) забезпечує живлення імпульсної лампи під час налагодження оптичної схеми. Імпульсний трансформатор (13) формує імпульс високої напруги для ініціювання робочого спалаху [5].

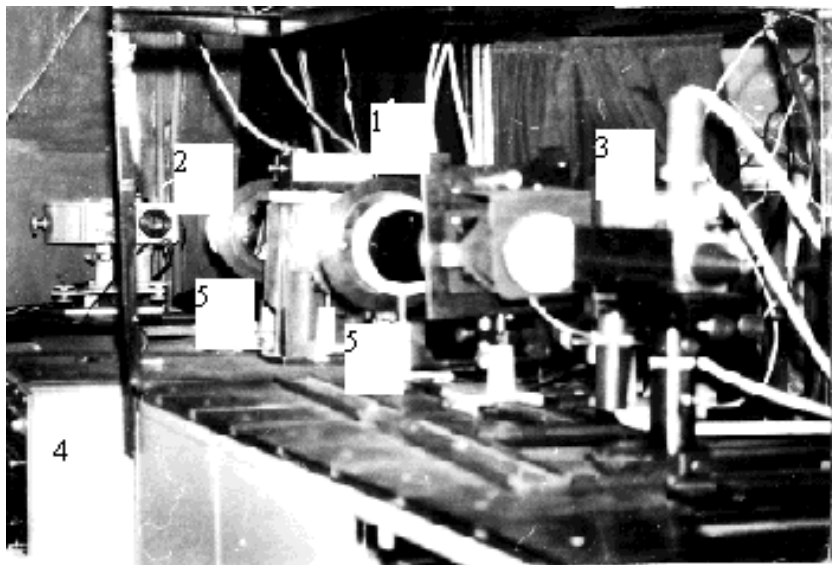


Рисунок 1.4 Зовнішній вигляд поляризаційно-динамічної установки:

1 – досліджувана модель з навантажувальним пристроєм; 2 – фотореєстратор СФР-1М; 3 – імпульсне джерело світла; 4 – енергетичний блок; 5 – поляризаційно-оптичні елементи [5]

Навантажувальний пристрій, показаний на рис. 1.5., містить зразок (1), дві пари мідних проводів (3) і (4), (5) і (6), причому між вузькими проводами (3) і (5) вклеєна плоска модель за допомогою епоксидного клею (7). Широкі проводи (4) і (6) виконані у вигляді прямокутних балок, що через ізоляційні жорсткі прокладки (8), закріплені обіймами (12), з ізолюючими прокладками (13) і затискними гвинтами (14), до двох жорстких пластин (9) з вікнами (10). Для проходження струму одного напрямку в кожній із пар проводів (3) і (4), (5) і (6) вони з'єднані паралельно електропровідними шинами (15), а пари проводів (3) і (4), (5) і (6) з'єднані послідовно електропровідною шиною (16).

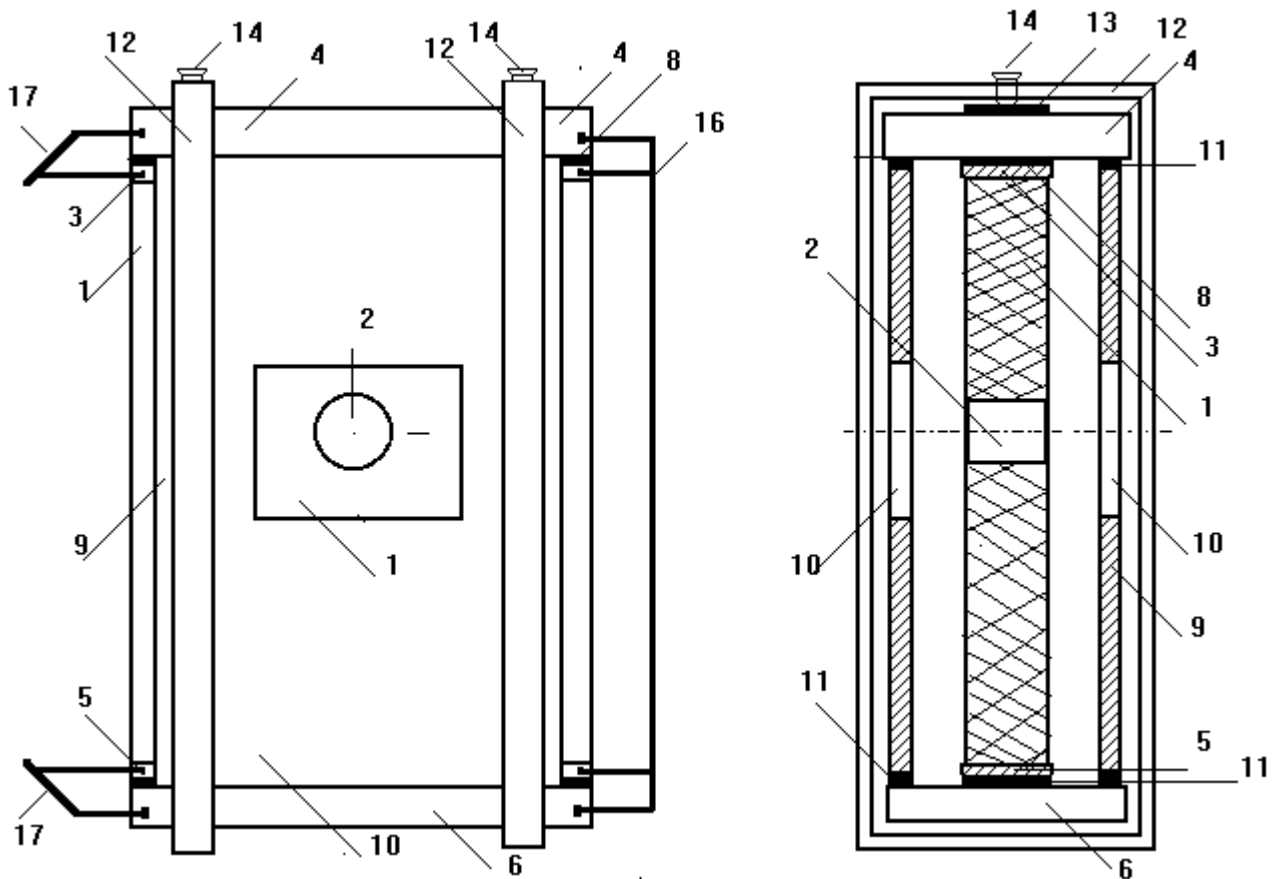


Рисунок 1.5 Пристрій для імпульсного навантаження зразків

За допомогою електропровідних шин (17) проводи вмикаються у зовнішнє електричне коло розрядника установки (рис.1.4.), монтаж яких здійснено таким чином, щоб максимально зменшити індуктивність кола. Подібне сполучення проводів (коли $I = I_1 + I_2$) приводить до виникнення сил притягання між проводами [5].

Коли протікає струм по парах дротів, струми у вузькому і широкому дроті кожної пари розділені проміжком за допомогою пружної ізоляції (8). Між дротами (3) і (4), (5) і (6) виникає сила притягання, що приводить до переміщення вузьких дротів (3) і (5), бо переміщення широких обмежені жорсткими пластинами (9), до яких вони жорстко кріпляться через ізолюючі прокладки (11), за допомогою обойм (12), затискаючих гвинтів (14) і ізолюючих прокладок (13) [5].

До бокових протилежних граней моделі (1) приклеєні вузькі дроти, і тому вона отримує імпульс розтягу. Через те що імпульс струму проходить через дроти в обох парах одночасно, то хвилі розтягу сформувавшись на двох протилежних гранях

досягають центра моделі також одночасно і ініціюють розвиток тріщини. Виникнення і розвиток напруженого стану в околі вершини тріщини фіксується у вигляді динамічної картини інтерференційних смуг, через вікно (10) в пластинах (9) [5].

1.4. Основні теорії граничного стану

Ключове місце у інженерній практиці обчислень на міцність реальних елементів конструкцій мають теорії граничного стану. Важлива оцінка надійності та міцності при експлуатації та проектуванні таких елементів конструкцій є визначення напружено-деформованого стану. Якщо поставити основні питання сучасного машинобудування: чи буде мати місце руйнування елемента конструкції та який запас міцності даного елемента конструкції? То на це запитання розподіл напружено-деформованого стану, розподіл концентрації напружень, одержання величини коефіцієнта інтенсивності напружень біля тріщин простої відповіді не дають.

Для елементів конструкцій верстатів, виготовлених з полімерних матеріалів, міцність залежить від механічних чинників (напружений стан, присутність концентратора, крайовий ефект, розмір деталі), а також від групи фізичних чинників (температура, вологість, радіація). Для металів наявні механічні теорії міцності мають більш кращі результати, ніж для полімерів.

Науковцями отримані вагомні успіхи, в розробці різноманітних теорій міцності. Велика кількість наявних чинників впливу на міцність та надійність дійсних натурних конструкцій не допускає утворити єдину універсальну теорію. Це стверджує значна кількість наявних теорій міцності та належних критеріїв [10, 12]. Для кожної з них є свої межі використання, де найбільш відповідно описано конкретний граничний стан конструкцій. Всі теорії міцності корисні та необхідні при технічних розрахунках. Більшість з них мають право на існування. В основі всіх механічних теорій міцності закладено відповідну формулу для дефініції еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ за визначеними головними напруженнями σ_1 , σ_2 , σ_3 та зіставлення $\sigma_{екв}$ з деяким максимальним напруженням σ_* , яке визначається

для цього матеріалу на тарувальних дослідженнях (деформації можуть також бути граничними вимірами, які визначають ресурси міцності).

Відмітимо, що чимало теорій оцінки міцності застосовується для конструктивних матеріалів, які не мають дефектів. Враховуючи велику концентрацію напружень в місцях технологічних концентраторів, присутність дефектів, насамперед тріщин, етап працездатності (тобто розвиток дефекту від початкової величини до певного критичного значення) в багатьох випадках є визначальним, якщо оцінювати надійність й запас міцності елементів машин та конструкцій [9, 10 - 39]. В роботі [40] показано вирішення даного комплексу задач для технічних та інженерних розрахунків.

В роботах [41, 42, 12, 23 – 29] показані проблеми дослідження різних аспектів міцності конструкцій з полімерних матеріалів. За своєю будовою полімерні матеріали можна поділити на лінійні (до яких відносять органічне скло), та сітчасті (до яких відносять матеріали, що утворюються на основі епоксидно-діанових смол). Лінійні полімери мають більш прогнозований процес руйнування. Сітчасті полімери руйнуються менш прогнозовано. Для них визначають статистичні залежності для декотрих середніх величин.

Механічні теорії міцності мають задовольняти певні умови [12]:

- механічна теорія міцності (МТМ) має базуватися і погоджуватись з експериментальними даними, що отримані за найпростіших напружених станах;
- критерії міцності мають бути простими і зручними у використанні;
- механічна теорія міцності має мати фізичну основу та містити виміри, які можна отримати в результаті експерименту;
- критерій міцності має не залежати від вибору системи координат, тобто має бути в інваріантній формі [4].

Потрібно зауважити, що у всіх механічних теоріях міцності на формули для дефініції еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ не має впливу зміна фізичних чинників (температура, вологість, радіація). Для досліджуваного матеріалу в даних умовах може змінюватись лише межа міцності σ_* , яку потрібно визначати. Механічна теорія міцності не повністю враховує існуючі фізичні чинники. Окрім того,

механічна теорія міцності описує граничний стан конструктивних матеріалів в яких відсутні дефекти [12, 30 - 32].

Автор робіт [33 - 35] запропонував фізико-механічний критерій (критерій тензора діелектричної проникності) граничного стану діелектриків, який дозволяє комплексно врахувати вплив механічних та фізичних чинників для коректного навантаження прозорих діелектриків.

1.5. Висновки до розділу 1

У розділі 1 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.

РОЗДІЛ 2
 ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ОПТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ
 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРОЗОРИХ
 КОМПОЗИТИВ (СКЛОПЛАСТИКІВ)

2.1. Основні співвідношення динамічної фотопружності ортотропних тіл

В загальному випадку розповсюдження пружних хвиль в анізотропному середовищі описується рівнянням руху [43]

$$E_{ijkl} U_{klj} = \frac{\rho \partial^2 U_i}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

де E_{ijkl} – модулі пружності, ρ – ефективна масова густина, U_{klj} – тензор переміщень.

Конструктивно-анізотропний матеріал будемо розглядати як однорідний анізотропний континуум, характеристики якого знайдемо із співвідношень статички. Визначення оптико-механічних і пружних сталих будемо проводити при динамічному навантаженні.

Визначення НДС методом динамічної фотопружності проводяться на плоских зразках. Тому із формули (4.1) виключимо похідні по координаті z . Рівняння для плоского напруженого стану в декартовій системі координат, набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X &= \frac{\rho \partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y &= \frac{\rho \partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Рівняння Коші:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (2.3)$$

Для плоскої задачі із шести рівнянь сумісності деформацій Сен-Венана залишається одне:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0. \quad (2.4)$$

Для ортотропного тіла закон Гука в прямій формі:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= T_{11} \sigma_x + T_{12} \sigma_y; \\ \varepsilon_y &= T_{21} \sigma_x + T_{22} \sigma_y; \\ \gamma_{xy} &= T_{33} \tau_{xy}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

тут
$$T_{11} = \frac{1}{E_1}; \quad T_{22} = \frac{1}{E_2}; \quad T_{33} = G_{12}; \quad T_{21} = -\frac{\nu_1}{E_2} = -\frac{\nu_2}{E_1},$$

та в оберненій формі:

$$\sigma_x = R_{11} \varepsilon_x + R_{12} \varepsilon_y; \quad \sigma_y = R_{21} \varepsilon_x + R_{22} \varepsilon_y;$$

$$\tau_{xy} = R_{33} \gamma_{xy},$$

де
$$R_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_1 \nu_2}; \quad R_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_1 \nu_2}; \quad R_{33} = G_{12};$$

$$R_{12} = R_{21} = \frac{\nu_1 E_1}{1 - \nu_1 \nu_2} = \frac{\nu_2 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2}.$$

Для осей координат x, y , що не збігаються із осями пружної симетрії ортотропного тіла формула (2.5) набуде вигляду [5]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= T'_{11} \sigma_x + T'_{12} \sigma_y; \\ \varepsilon_y &= T'_{21} \sigma_x + T'_{22} \sigma_y; \\ \gamma_{xy} &= T'_{33} \tau_{xy}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В довільних осях компоненти матриці $\{T'\}$ виражаються через компоненти матриці $\{T\}$ в головних осях ортотропії за залежностями [146]:

$$T'_{11} = \frac{1}{E_1} = T_{11} \cos^4 \theta + (2T_{12} - T_{33}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + T_{22} \sin^4 \theta;$$

$$T_{12}' = \frac{V_1}{E_1} = T_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (T_{11} + T_{22} - T_{33}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta;$$

$$T_{22}' = \frac{1}{E_1} = T_{11} \cos^4 \theta + (2T_{12} + T_{33}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + T_{22} \cos^2 \theta;$$

$$T_{33}' = \frac{1}{G_{12}} = 2(2T_{11} + 2T_{22} - 4T_{12} - T_{33}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + T_{33} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta), (2.7)$$

тут θ – кут повороту осей координат [5].

Для визначення напруження в імпульсі, використаємо відношення для поздовжніх напружень в одновірній хвильовій задачі для пружного ортотропного середовища вздовж осей армування

$$\sigma_{x(x,t)} = \rho C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \rho C u'_{(x,t)}. (2.8)$$

У випадку лінійного в'язкопружного середовища та використовуючи перетворення Лапласа запишемо:

$$\sigma_{x(x,t)}^* = \rho C_t u'_{(x,t)}. (4.9)$$

Використаємо інтеграл Дюамеля та одержимо:

$$\sigma_{x(x,t)}^* = \rho \int_0^t C_{(t-\tau)} du'_{(x,t)}. (2.10)$$

Частинами проінтегруємо та використаємо нульові початкові умови [5]:

$$\sigma_{x(x,t)}^* = \rho \left[\int_0^t C''_{(t-\tau)} u_{(x,t)} d\tau + C'_{(0)} u_{(x,t)} + C_{(0)} \dot{u}_{(x,t)} \right], (2.11)$$

де $C'_{(0)}$ – похідна по часу від швидкості поширення збурення на фронті хвилі, $C_{(0)}$ – швидкість поширення фронту збурення [5].

Перший член у формулі (2.11) відповідає розв'язку пружної задачі, два інші – в'язкопружної. Якщо обмежити (2.11) першими двома членами, то отримаємо залежність для наближеного визначення максимальних напружень в імпульсі. Припустимо, що в момент часу t напруження $\sigma_{x(x,t)}$ досягає максимального

значення в перерізі x , то в цьому випадку похідна від $\sigma_{x(x,t)}$ по x дорівнює нулю.

Продиференціюємо по x два перших члени виразу (2.11) [5]:

$$\frac{\partial \sigma_{x(x,t)}^*}{\partial x} = \rho \left[C_{(0)} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + C'_{(0)} \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \sigma_{x(x,t)}^*}{\partial x} = \rho \left[C_{(0)} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} + C'_{(0)} \varepsilon_x \right], \quad (2.13)$$

де $\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_x$, ε_x , $\frac{\partial x}{\partial t}$ визначаються в момент часу t при $x = x_u$.

Для отримання похідної по часу від швидкості $C'_{(0)}$ прирівняємо (2.13) до нуля [5]:

$$C'_{(0)} = - \frac{C_{(0)} \partial \varepsilon_x}{\varepsilon_x \partial t}. \quad (2.14)$$

Залежність для визначення напружень в лінійному в'язкопружному ортотропному матеріалі при дії імпульсу стиснення уздовж головної осі анізотропії: [5]

$$\sigma_{x(x,t)}^* = \rho C_{(0)} \left[\frac{\partial u}{\partial t} - u \frac{\partial \varepsilon_x / \partial t}{\varepsilon_x} \right]. \quad (2.15)$$

2.2. Дослідження динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень методом фотопружності

Рух вершини тріщини та динамічний характер навантаження зумовлюють врахування сил інерції, при розгляді динамічної задачі теорії пружності для тіла з рухомою тріщиною. Дослідження таких задач ускладнюються труднощами експериментальних досліджень швидкоплинних процесів так і в математичних обчисленнях.

Закономірності впливу локальних неоднорідностей на кінетику швидких тріщин відбитих поперечних і поздовжніх хвиль вивчали в роботі [44]. При математичному опису процесу поширення тріщини є визначення загальних закономірностей розподілу полів переміщень і напружень в околі вершини тріщини. На основі теоретичного аналізу багато дослідників вказують на

залежність напруженого стану (коефіцієнтів інтенсивності напружень) від швидкості поширення вершини тріщини. Тобто, якщо вершина тріщини переміщується вздовж кривої з довільною швидкістю, то в локальній системі координат, що пов'язана з вершиною тріщини (рис.2.1), швидкість руху цієї вершини залежить від кутового розподілу напружень [45].

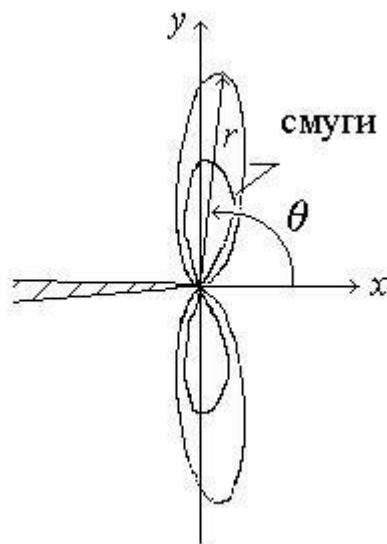


Рисунок 2.1 Система координат при вершині тріщини

За нормального відриву компоненти тензора напружень мають вигляд [5]:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_{(t)}}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{xx}(\theta, \nu) + O_{(1)}; \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{(t)}}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{yy}(\theta, \nu) + O_{(1)}; \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_{(t)}}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{xy}(\theta, \nu) + O_{(1)},\end{aligned}\tag{2.16}$$

де θ – рухомі полярні координати з миттєвим центром при вершині тріщини; ν – швидкість вершини тріщини; $K_{(t)}$ – динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень, що визначається як і у випадку стаціонарної тріщини, за допомогою граничного співвідношення [5]:

$$K_{(t)} = \lim \sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_{yy}(r, \theta, t).\tag{2.17}$$

Із (2.16) отримують функції, що залежать від полярного кута і швидкості вершини тріщини [5]:

$$\begin{aligned}\Phi_{xx}(\theta, \nu) &= \frac{(1 + \delta_1^2)r_1^{\frac{1}{2}}}{R(\delta_1, \delta_2)} \left[(1 + 2\delta_1^2 - \delta_2^2) \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{r_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{4\delta_1\delta_2 \cos \frac{\theta}{2}}{(1 + \delta_2^2)r_1^{\frac{1}{2}}} \right]; \\ \Phi_{yy}(\theta, \nu) &= \frac{(1 + \delta_2^2)r_2^{\frac{1}{2}}}{R(\delta_1, \delta_2)} \left[(1 + \delta_2^2) \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{r_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{4\delta_1\delta_2 \cos \frac{\theta}{2}}{(1 + \delta_2^2)r_2^{\frac{1}{2}}} \right]; \\ \Phi_{xy}(\theta, \nu) &= \frac{2(1 + \delta_2^2)\delta_1 r_1^{\frac{1}{2}}}{2(\delta_1, \delta_2)} \left(\frac{\sin \frac{\theta_1}{2}}{r_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{\sin \frac{\theta_2}{2}}{r_2^{\frac{1}{2}}} \right),\end{aligned}\tag{2.18}$$

де: $\delta_{1,2}^2 = 1 - \frac{\gamma^2}{C_{1,2}^2}$; $r_1 \cdot \ell^{i\theta} = x + \delta_1 y$; $r_2 \cdot \ell^{i\theta} = x + \delta_2 y$;

c_1 і c_2 – швидкості поздовжних і поперечних хвиль;

$$R_{(\delta_1, \delta_2)} = 4\delta_1\delta_2(1 + \delta_2^2)^2 - \text{функція Релея.}$$

Для оптично-чутливого матеріалу ЕД-16 МА та ЕД-20 МТГФА розрахунок залежності $\Phi_{yy}(\theta)$ при підстановці в (4.18) показав, що відмінність її для діапазону зміни швидкості тріщини від (0 до 0.5) c_2 не перевищує 5%. На рис.2.2 показана графічна залежність функції $\Phi_{yy}(\theta)$ від відносної швидкості ν/c_2 .

Для матеріалів типу ЕД-20 МА і ЕД-20 МТГФА застосування закону Вертгейма цілком обґрунтовано при умові визначення оптичних сталих із динамічних випробувань [45].

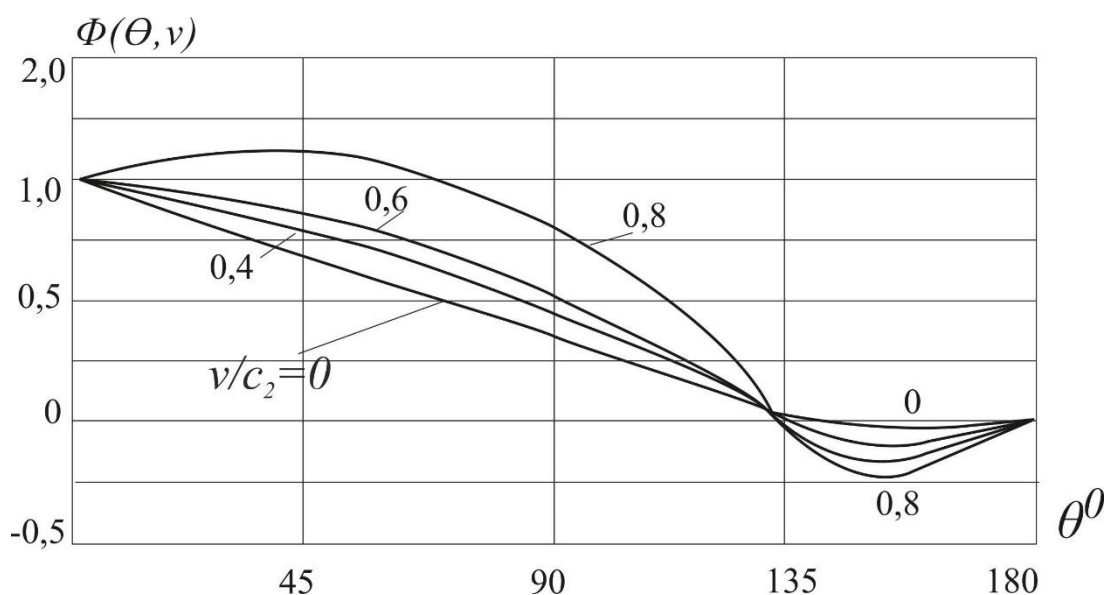


Рисунок 2.2 Залежність функції $\Phi_{yy}(\theta)$ від відносної швидкості ν/c_2

Дослідження закономірностей розвитку руху вершини тріщини, що спричиняється імпульсним навантаженням доцільно проводити з використанням змішаних експериментально-аналітичних або експериментально-числових підходів, в яких критерії руйнування і взаємозв'язки між параметрами, які описують процес руйнування, одержують на основі експериментальних даних. Отримані результати досліджень можуть бути використані для удосконалення аналітичних і числових методів аналізу процесів тріщиноутворення, уточнення моделей крихкого руйнування при динамічному навантаженні.

Зміну КІН в часі поблизу вершини центральної тріщини в ізотропній пластині при імпульсному навантаженні досліджували експериментально-числовим методом. Для того, щоб однозначно провести інтерпретацію експериментальних даних необхідно:

- 1) наявність аналітичного розв'язку задачі механіки руйнування для даного типу навантаження;
- 2) проведення реєстрації процесу руйнування від початку дії навантаження на тріщину до повного зруйнування зразка;
- 3) утворення тріщини одним типом хвиль.

Процес руйнування ініціювався плоскою симетричною хвилею розтягу, яку отримували за допомогою пристрою для електродинамічного генерування імпульсів навантаження [5].

Експеримент проводили на зразках у вигляді прямокутної пластинки з центральною тріщиною (рис.2.3).

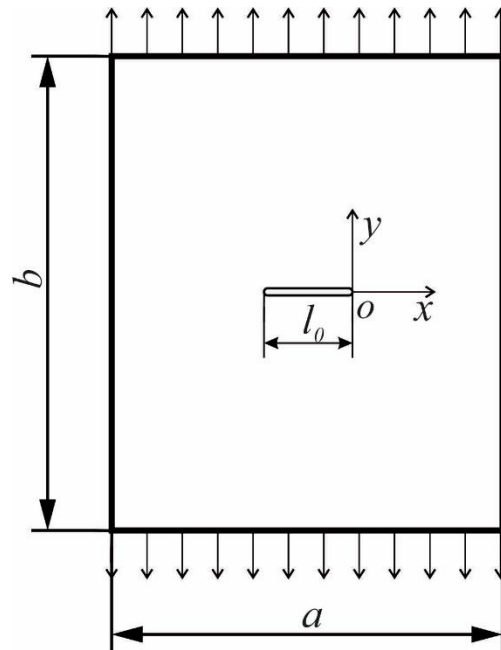


Рисунок 2.3 Розміри та форма зразка

Розміри: ширина $a = 90$ мм; довжина $b = 120$ мм; товщина $h = 3$ мм; довжина тріщини $l_0 = 10$ мм. Динамічний КІН $K_I(t)$ визначали за допомогою методики в основу, якої покладена динамічна асимптотика напружень у вершині рухомої тріщини [46]. У випадку плоского напруженого стану зразка і деформації нормального відриву динамічний КІН $K_I(t)$ визначали за формулою (2.19) [5]:

$$K_I(t) = \frac{\sigma_0^{1,0} m(t)}{h} \sqrt{2\pi r(t)} \cdot F(v) \quad (2.19)$$

де $F(v)$ – швидкісна поправка; $r(t)$ – відстань від вершини тріщини до найближчої ізохроматичної смуги із порядком m в момент часу t .

Експериментальні дані для визначення напружень і коефіцієнтів інтенсивності напружень при імпульсі розтягу отримані за допомогою різних реєструючих пристроїв. Потрібно врахувати для суміщення в часі залежностей $K_I(t)$ і $\sigma(t)$ те, що реєстрація імпульсу розтягу здійснювалася на відстані 25 мм від осі тріщини і це приводить до зсуву його по часу на 12,5 мкс. Цей метод дозволив знайти напруження, що діє на береги тріщини при динамічному навантаженні в момент її зрушення [5].

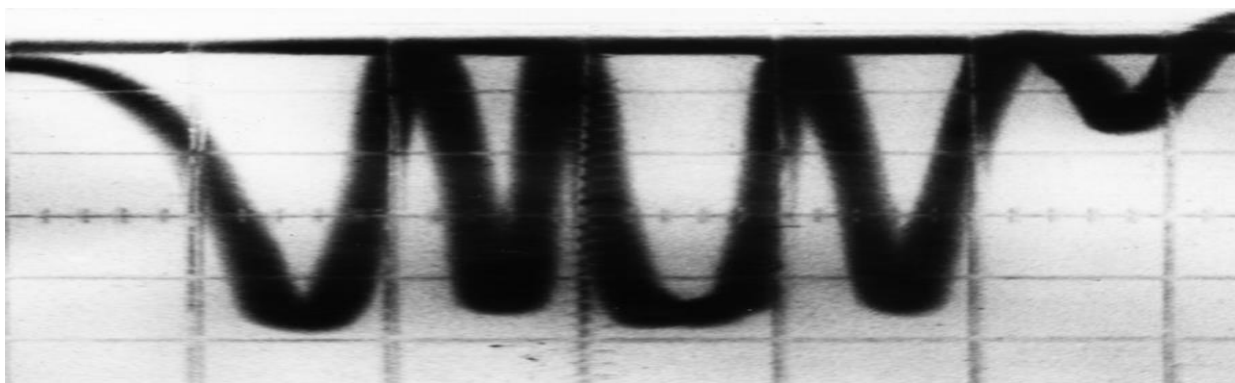


Рисунок 2.4 Фотоелектронний запис порядків ізохром (осцилограма)

Побудова графіку зміни K_I від часу проведена після чисельної обробки результатів експерименту. Приведена на рис.2.5 залежність (1 - ▲) , що отримана за результатами експерименту, порівнювалася із залежностями отриманими при розв'язанні задачі методом скінчених елементів (2 - ○) [47] та із розв'язком модифікованим методом скінчених елементів (3 - ●) [48]. Для проведення аналізу використано безрозмірний масштаб часу $t^* = t v_p/a$.

Похибка у величинах отриманих методом експерименту (1) та із розв'язку модифікованим методом скінчених елементів (3) складає 5% тоді, як розбіжність між експериментом і розв'язком методом скінчених елементів (2) сягає 10%.

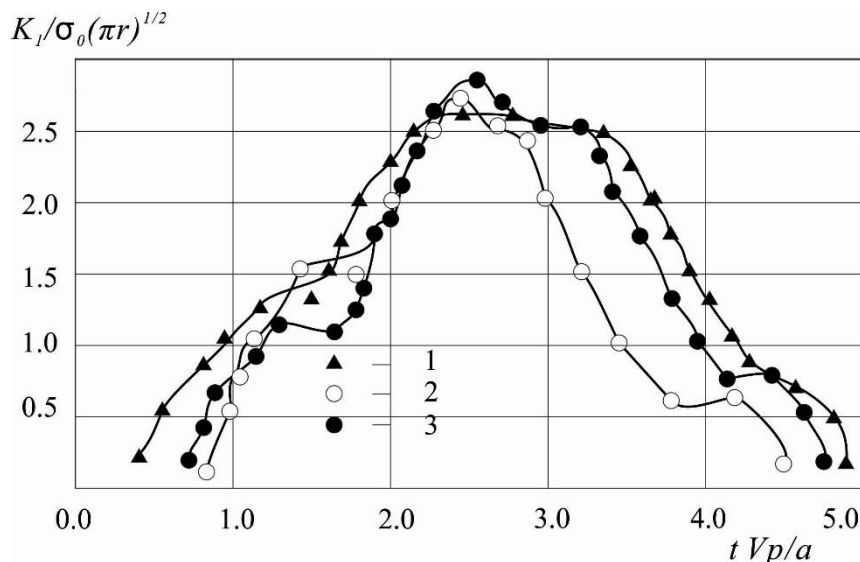


Рисунок 2.5 Залежність K_I в околі вершини центральної тріщини в ізотропній пластині при дії імпульсного навантаження: залежність (1 - ▲) отримана за результатами експерименту; залежність (2 - ○) - методом скінчених елементів; залежність (3 - ●) - модифікованим методом скінчених елементів

2.3. Напружений стан пластин із центральним круговим отвором та тріщиною при імпульсному навантаженні

В верстатобудуванні використовують конструктивні елементи у вигляді пластин з отворами та концентраторами напружень. При проведенні експериментальних досліджень отримані результати напруженого стану та швидкості поширення вершини ізольованої тріщини в пластинах із центральним круговим і еліптичним отвором, які перебували під дією імпульсного розтягу. Під дією ударних та вибухових навантажень динамічний характер імпульсного навантаження враховується при розрахунках на експлуатаційну міцність.

При дії імпульсного навантаження на тріщину проходить істотний перерозподіл напружень поблизу вершини тріщини і за певних умов може викликати її поширення. Тобто, під дією імпульсного впливу достатньої потужності в твердому тілі, можливе виникнення процесу руйнування і за відсутності статичних напружень [5].

Проводили дослідження на двох групах зразків, які відрізнялися формою отворів і розміщенням тріщини. Виготовлялись зразки із оптично-чутливого матеріалу ЕД-20 МГТФА у вигляді пластинок з центральним отвором і

ізолюваною тріщиною. Розміри зразку №1: $a = 90\text{мм}$; $b = 120\text{мм}$; $c = 11\text{мм}$; $d = 15\text{мм}$; $l = 15\text{мм}$. Зразок №2: $a = 90\text{мм}$; $b = 120\text{мм}$; $c = 11\text{мм}$; $d_1 = 16\text{мм}$; $d_2 = 8\text{мм}$; $l = 15\text{мм}$, рис.4.6.

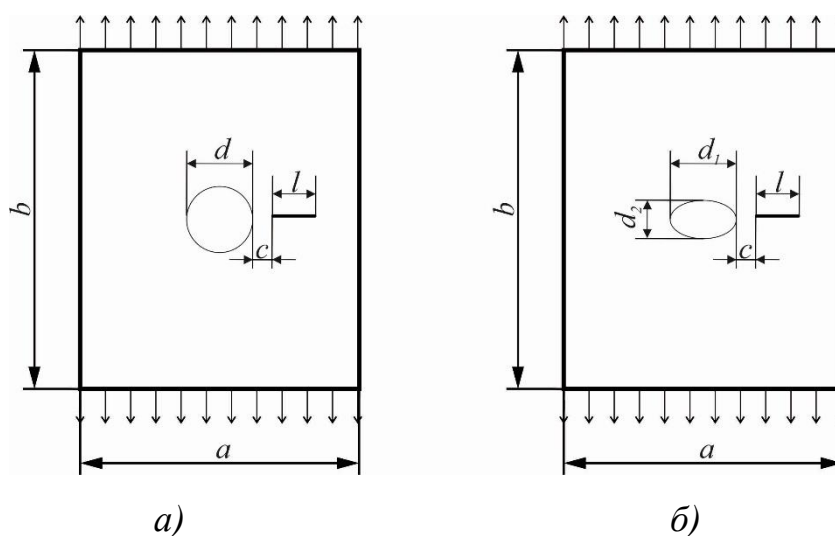


Рисунок 2.6 Розміри і форма зразків

При утворенні імпульсних навантажень в зразках, форма і тривалість імпульсу контролювались за осцилограмою зміни струму в колі високострумового розряду. Залежність струму від часу $J(t)$ показана на рис. 2.7. На цьому рис. приведена залежність струму (2) у випадку застосування спеціального пристрою для відсікання закінчення високострумового розряду. При використанні такого пристрою є можливість послабити вплив перехідних електромагнітних процесів у контурі розрядника, які спотворюють форму імпульсу навантаження [146].

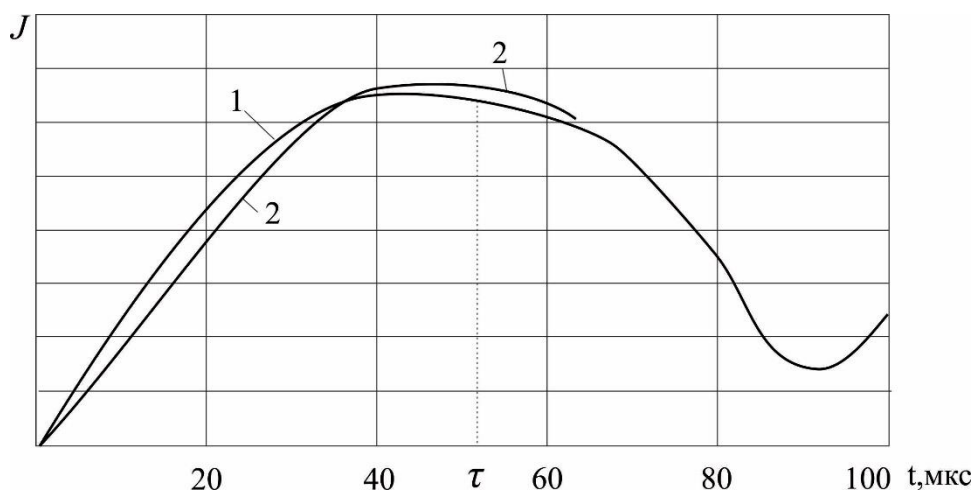


Рисунок 2.7 Тривалість імпульсу та форма струму в колі розрядника

Експеримент повторювався на п'яти зразках однієї групи для підвищення точності результатів. При підготовці до експериментального дослідження зразок розміщувався в пазах рухомих планок пристрою для збудження імпульсів розтягу і закріплювався за допомогою епоксидного клею (ЕД-20 ПЕПА). Потім залишали пластину при кімнатній температурі (20 - 21°C) на 5-6 годин, а для наступної полімеризації на 14-16 годин в термошафі (120°C).

Експериментальні дослідження проводились на поляризаційно-динамічній установці [5]. Для фіксації динамічного процесу застосовувалась схема паралельного просвічування (напрямок просвічування зразку паралельний до площини тріщини), що надало можливість фіксувати напружений стан в околі вершини тріщини, так і реєструвати вершину рухомої тріщини.

Отже, результати експерименту, що містять дані про рух вершини тріщини та про величини коефіцієнтів інтенсивності напружень, можуть визначатися в результаті аналізу інтерференційних смуг.

Результати дослідження процесів руйнування за схемою паралельного просвічування, з достатньою точністю відносяться до справжньої вершини тріщини. У випадку, коли величина імпульсного навантаження не приводить до руйнування моделі, виникала цікавість дослідження зміни напруженого поля біля вершини тріщини. Окремі фрагменти кінограми ізохроматичних смуг при досягненні фронту хвилі розтягу вершини ізольованої тріщини і контуру отвору наведені на рис.2.8.

При аналізі картин ізохром виявилось, що максимальні напруження біля контуру отвору і вершини ізольованої тріщини виникають при проходженні їх хвилею навантаження. Значення максимального динамічного коефіцієнта інтенсивності $K(t)$ дорівнювало $5.9K_c$ ($K_c = 0,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ – середнє значення величини, що визначається в момент зрушення тріщини).

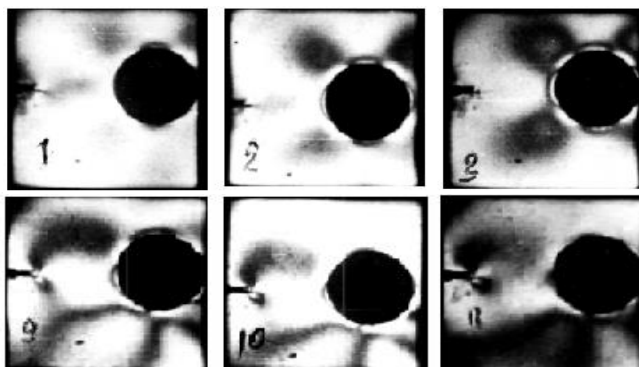


Рисунок 2.8 Окремі фрагменти кінограми ізохроматичних смуг при досягненні фронту хвилі вершини тріщини і контуру отвору

Прямолінійність фронту хвилі навантаження, коли вона підходить до контуру отвору, поступово порушується. При цьому формуються місця концентрацій напружень. В проведених експериментах на зразках, які вільні від статичних навантажень розтягу, тріщина розповсюджувалася прямолінійно вздовж лінії, що проходила через центр отвору. На зразки із круговим і еліптичним отвором та ізольованою тріщиною діяла енергія $W= 4,6 \text{ КДж}$ і $W=4,5 \text{ КДж}$ відповідно (енергія запасалась в конденсаторах). На рис. 2.9 подано кінограму картини ізохром, що показує рух ізольованої наскрізної тріщини в пластині із коловим отвором (зразок 1).

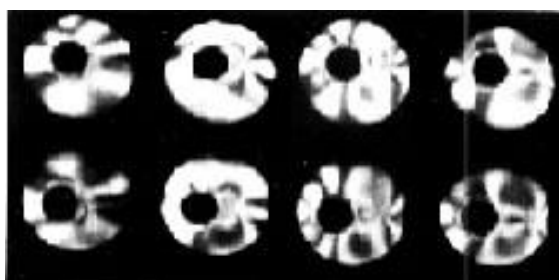


Рисунок 2.9 Фрагменти кінограми з картинами ізохроматичних смуг при русі вершини ізольованої тріщини

Зміна швидкості руху вершини тріщини протягом часу в моделі з круговим отвором і тріщиною показано на рис.2.10. Аналізуючи кінограми, відмічаємо, що рух тріщини супроводжується утворенням в околі її вершини симетричних

відносно площини тріщини смуг ізохром. Це означає, що біля вершини тріщини виконувалися умови нормального відриву.

Проаналізувавши результати експерименту виявили: середня швидкість тріщини протягом всього шляху, пройденого вершиною, мала величину 330 - 350 м/с і лише при виході на контур отвору збільшувалася.

Підвищення швидкості вершини тріщини, коли вона виходить на контур отвору пояснюється зоною розтягу в околі вершини тріщини. При зміні прискореного та сповільненого руху відмічено пульсуючий характер зростання тріщини. Максимальне значення середня швидкості набуває в кінці руху. Час прискореного руху $t=2-2,5$ мкс., а час сповільненого – $t=3-3,5$ мкс,

Під час прискорення, максимальна швидкість вершини тріщини, сягала 850-900 м/с, при цьому зміна величини коефіцієнту інтенсивності напружень слабо впливала на швидкість тріщини.

Зміну з часом коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ в пластинці з круговим отвором і ізолюваною тріщиною під впливом імпульсу розтягу показано на рис. 2.10.

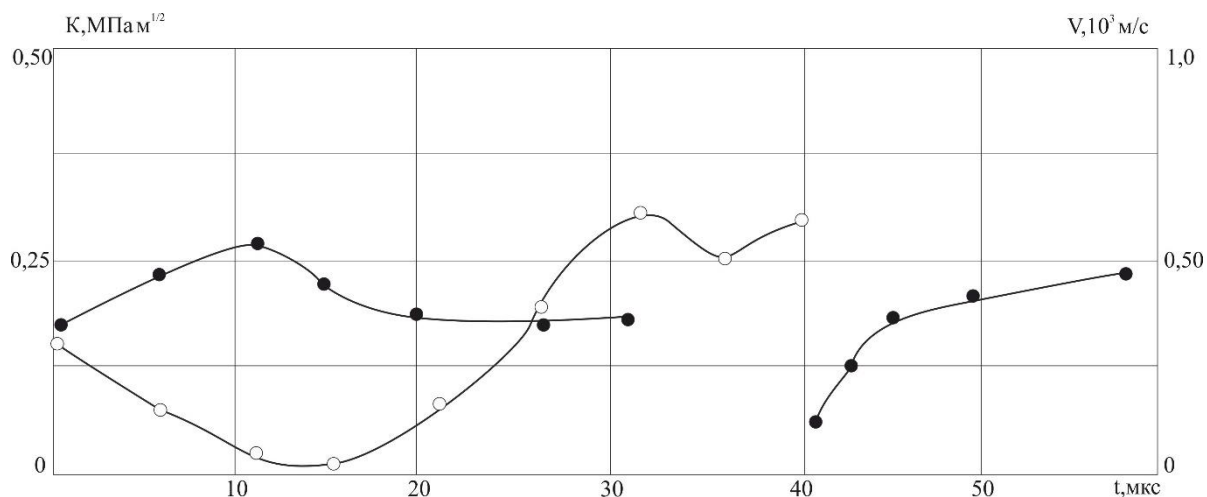


Рисунок 2.10 Зміна швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (○) і коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ (●) від часу в зразку з центральним круговим отвором і ізолюваною тріщиною

З приходом фронту хвилі навантаження до концентраторів напружень відбувається початок зростання коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині

стаціонарної тріщини, що відповідає часу 29-30 мкс від моменту прикладання імпульсу розтягу до країв пластинки. Перед початком руху тріщини максимальне значення коефіцієнта інтенсивності $K(t)$ складає в даному експерименті $K = 3,0K_c$. За результатами експериментів зміна в часі величин $K(t)$, проведених при одному і тому ж значенні енергії прикладеного імпульсу, відбувалася аналогічним чином і різниця в кількісному відношенні складала не більше 5% [49]. Найбільш віддаленні від вершини тріщини ізохроми, що починаються із цієї вершини, на ній же і замикаються, чого не спостерігалось в роботі [50]. Ізохроми, що з'явилися після приходу хвилі напружень до вершини тріщини, симетричні і замикаються на ній. А це вказує на наявність в цей момент часу умов нормального відриву [51].

Провівши аналіз величин $K(t)$ і V в часі, відмітимо, що будь які коливання петель ізохром, а отже, і значень величини коефіцієнта інтенсивності напружень відсутні (рис.2.10). Тоді, стрибкоподібний характер руху вершини тріщини супроводжувався плавною зміною величини коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$.

2.4. Висновки до розділу 2

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

Одержано величини КІН для тріщин поблизу центрального отвору у пластині з склопластику при імпульсному навантаженні. Максимальні значення КІН для зразку з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною становлять: $K_I = 0,29 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Величини середньої швидкості вершини тріщини для зразка з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною становлять: $V = 320\text{-}34$

РОЗДІЛ 3
ГРАНИЧНИЙ СТАН ДЕЯКИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ
ПРОЗОРИХ КОМПОЗИТІВ (СКЛОПЛАСТИКІВ), ЯКІ МІСТЯТЬ
ГЕОМЕТРИЧНІ КОНЦЕНТРАТОРИ

Значну практичну цікавість має дослідження напруженого-деформованого і граничного стану конструктивних елементів виготовлених з пластин (склопластиків), що мають два або кілька отворів, які досить часто застосовуються в конструкціях [52-55]. Зазвичай крихке руйнування починається з поверхні концентраторів. Тоді доцільно дослідити напружений та граничний стан, що спричиняє розвиток тріщин, які починаються з контуру отвору [56-58, 62-64].

При малих швидкостях руху вершини тріщини на початку процесу енергія руйнування зменшується [59]. Це зумовлено структурною будовою епоксидної смоли, що є зшитим полімером. В роботах [60, 61] вказано, що в околі вершини тріщини утворюється зона непружних деформацій. Розміри і форма таких зон аналогічні тим, що помічаються в металах [60]. На зменшення величини енергії руйнування впливає зона непружних деформацій. Із збільшенням швидкості руху вершини тріщини енергія руйнування зменшується як в епоксидних матеріалах [61], так і в металах. Це відкриває можливості для моделювання процесів руйнування металів на зшитих полімерах. При швидкому поширенні тріщини непружні деформації розвиваються лише в малому околі біля вершини тріщини, то єдиною умовою при виборі матеріалу моделі є рівність (3.1) [5]:

$$\frac{\tau(\sigma_{ij}, T)}{\tau^*(\sigma, T)} = \frac{\tau(\bar{\sigma}_{ij}, T)}{\tau^*(\bar{\sigma}_{ij}, T)}. \quad (3.1)$$

Тут (3.1) розглядається як рівняння для визначення температури T випробовування моделі. Довговічність зв'язків в матеріалі [146]:

$$\tau^* = \tau_0^* \exp\left(\frac{-F_0^* + \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (3.2)$$

де γ , τ_0^* , F_0^* - сталі матеріалу.

Напруження і деформації визначимо за умови геометричної і силової подібності (3.3) [5]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}_n}{\sigma_n} \sigma_{ij}; \varepsilon_{ij} = \frac{G \bar{\sigma}_{ij}}{G \sigma_{ij}} \varepsilon_{ij} . \quad (3.3)$$

Швидкість тріщини:

$$\frac{\bar{C} \tau}{d_m} = \frac{C \tau}{d_n} , \quad (3.4)$$

де d_m , d_n - розміри кінцевої області тріщини в моделі і натурі [5].

Результати дослідження процесу руйнування ряду конструктивних елементів, які проведені на зразках наводяться нижче.

3.1. Руйнування ортотропних пластин із круговим та еліптичним отворами та тріщинами біля отворів при імпульсному навантаженні

Руйнування зразків з центральним круговим отвором і тріщиною (рис.2.6), відбувалося у дві стадії. Перша стадія: розвиток тріщини відбувався в бік контуру отвору. Друга стадія: після виходу вершини на контур отвору через час t_1 , починався рух протилежної вершини тріщини в бік вільного контуру зразку, що закінчувався утворенням щілини через час t_2 . Частина зразку протилежна відносно отвору залишалась не зруйнованою. В табл.3.1 наведено: час стадій руйнування, енергію руйнування та середню швидкість вершини тріщини.

Таблиця 3.1. – Енергія та час стадій руйнування, середня швидкість вершини тріщини

Зразок	W (10^3 Дж)	V (м/с)	t_1 (мкс)	t_2 (мкс)	t_3 (мкс)
№1	4,8	330-350	44	30	-
№2	4,9	350-360	33	39	90

Після утворення щілини між отвором і вільним контуром пластини аналіз картин ізохром вказав, що з часом зменшується інтенсивність динамічних

напружень. Коливання смуг ізохром поблизу отвору зумовлені власними коливаннями двох консольних балок, що утворились в напівзруйнованому зразку. Такі коливання здійснюються контактною взаємодією берегів щілини.

Пластини з центральним еліптичним отвором і ізольованою наскрізною тріщиною (рис. 3.6) руйнувались в три стадії. Перша стадія визначалась рухом вершини тріщини вбік від отвору і виходом тріщини на його контур. Друга стадія характеризувалась початком руху другої вершини і виходом її на вільний контур пластини. Під час третьої стадії утворювалась тріщина у вершині еліпса і остаточно проходило руйнування пластини. Дані стадії описуються величинами часу, середньої швидкості вершини тріщини, значення яких наведені в табл. 3.1.

Зміна швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ і коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ в часі у зразку з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною приведено на рис.5.1, які побудовані за результатами обробки кінограм.

Порівняльний аналіз зруйнованих однотипних моделей проводився для оцінки отриманих результатів при проведенні експерименту.

Вигляд зруйнованих зразків пластин з центральним круговим отвором і наскрізною ізольованою тріщиною та центральним еліптичним отвором з такою ж тріщиною наведений на рис. 3.2. Розвиток руху вершини тріщини в часі, в кожному однотипному зразку та аналіз зруйнованих поверхонь, вказує на досить високу повторюваність динамічних процесів.

В результаті проведених експериментів, можна відзначити наступне:

- 1) під час проходження первинною хвилею імпульсу області концентраторів напружень починається руйнування зразків;
- 2) при наближенні фронту хвилі до контуру отвору його прямолінійність порушується, одночасно формуються зони концентрації напружень, що мають вплив на процес руйнування;
- 3) руйнування окремих конструктивних елементів в зразках проходить за стадіями, які визначаються непрямолінійністю поширення фронту хвилі.

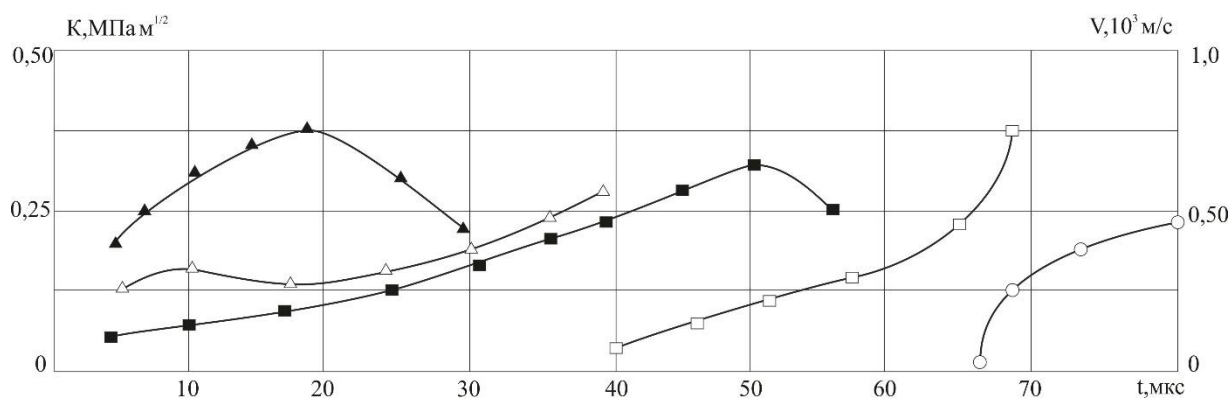


Рисунок 3.1 Зміна коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ (▲, ■) і швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ (□, ○) в часі у зразку з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною

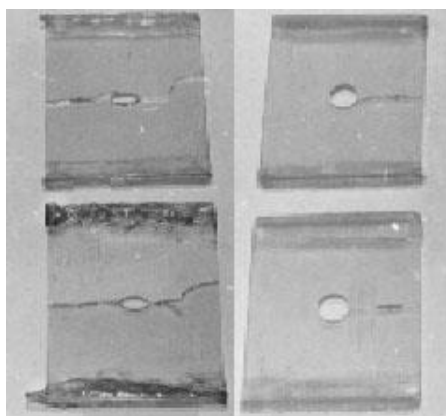


Рисунок 3.2 Вигляд зруйнованих зразків

На тріщиностійкість зразків впливають також форми криволінійного отвору (еліпс і коло). Більш тріщиностійким є зразок №1 із круговим отвором (рис. 2.6 а). Він в усіх випадках руйнувався наполовину при енергії $W=4.65$ КДж. Зразок №2 руйнувався повністю при цьому ж значенні енергії (рис. 2.6 б).

Стрибкоподібний рух вершини тріщини супроводжується плавною зміною величини коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$.

На високу повторюваність експерименту вказує характер руйнування кожного зразка [5].

3.2. Руйнування ортотропних пластин із центральним круговим отвором та двома симетричними тріщинами, які виходять на контур, при імпульсному навантаженні

Зразок з центральним круговим отвором і двома контурними симетричними тріщинами (рис. 3.3). Проаналізувавши кінограми, що отримані на поляризаційно-динамічній установці виявили, що утворення смуг ізохром в околі вершин тріщин відбувалося одночасно. Петлі ізохром біля рухомих вершин були симетричними відносно площини тріщин. Це вказує про наявність біля вершини тріщини умови нормального відриву, що надає можливість застосувати методику визначення коефіцієнту інтенсивності напружень $K(t)$, яка запропонована в розділі. 2.2.

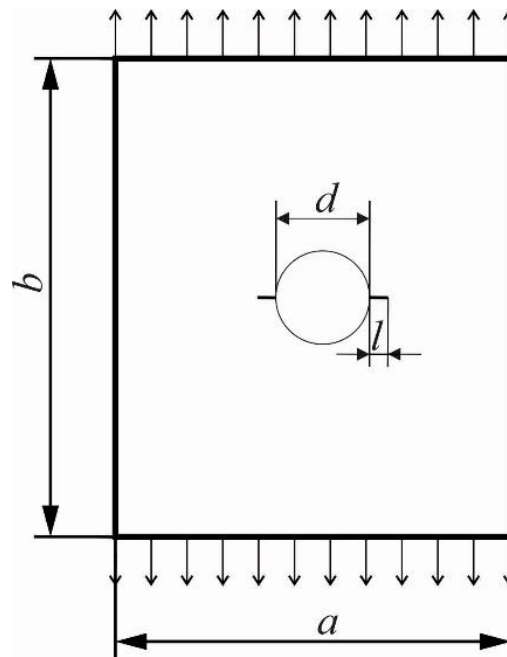


Рисунок 3.3 Зразок з центральним круговим отвором і двома контурними тріщинами

Розміри: $a = 90\text{мм}$; $b = 120\text{мм}$; $d = 15\text{мм}$; $l = 5.5\text{мм}$

Початок збільшення коефіцієнту інтенсивності напружень $K(t)$ співпадає в обох вершинах тріщин з приходом фронту хвилі навантаження. Перед початком руху тріщин відзначається максимальне значення динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень яке дорівнювало в даному експерименті $K = 3,6K_c$. Заряд конденсатора не перевищував величини енергії $W=4.25$ кДж, при якій відбувалося руйнування. Розвиток руху тріщин і повне руйнування зразку проходило

одночасно. Зміна коефіцієнта інтенсивності напружень $K(t)$ і швидкості руху вершини тріщини $V(t)$ від часу показана на рис. 3.4. Аналізуючи графіки відмітимо, що початок проміжку руху вершини тріщини до вільного контуру моделі характеризується збільшенням швидкості до 450 м/с і наступною зупинкою на 3-4 мкс. Далі, при виході вершини тріщини на вільний контур пластини, швидкість збільшувалась і сягала 750-800 м/с. Залежність коефіцієнту інтенсивності напружень $K(t)$ має більш плавний характер.

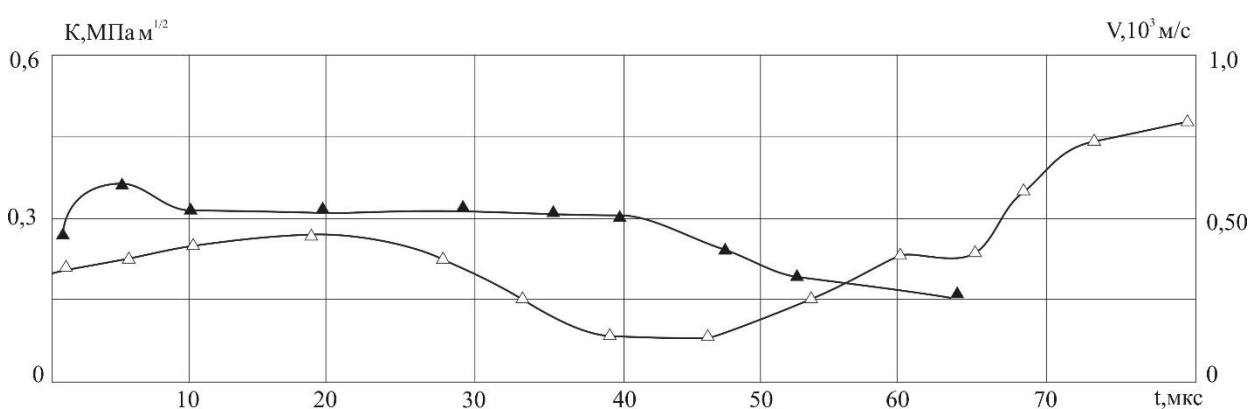


Рисунок 3.4 Зміна коефіцієнта інтенсивності напружень і швидкості руху вершини тріщини $K(t)$ (▲) і $V(t)$ (△) в часі у зразку з центральним круговим отвором і двома контурними тріщинами

3.3. Руйнування ортотропних пластин, які містять два отвори з радіальними тріщинами, що виходять на контури отворів, при їх вертикальному розміщенні (вздовж навантаження) при імпульсному навантаженні

Зразок з вертикально розміщеними круговими отворами одного радіусу, що мають по дві симетричні контурні тріщини (рис.3.5). Процес динамічного руйнування зразку викликав цікавість, оскільки зразок мав два небезпечних переріза.

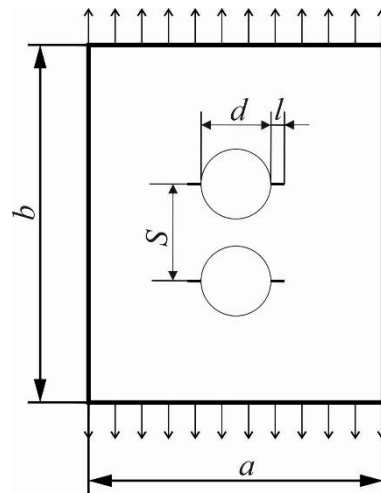


Рисунок 3.5 Зразок з вертикально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

Розміри зразку: $a = 90\text{мм}$; $b = 120\text{мм}$; $d = 15\text{мм}$; $l = 5,5\text{мм}$; $s = 25\text{мм}$.

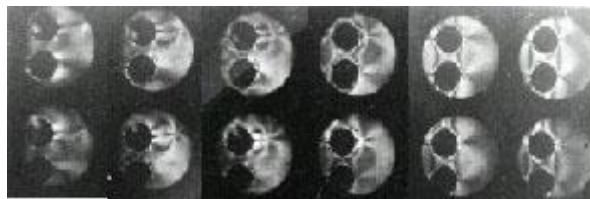


Рисунок 3.6 Окремі фрагменти кінограми інтерференційних смуг для зразку з вертикально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

На рис.3.7 наведені зміни $K(t)$ і $V(t)$ побудовані за картинами інтерференційних смуг з отриманих кінограм.

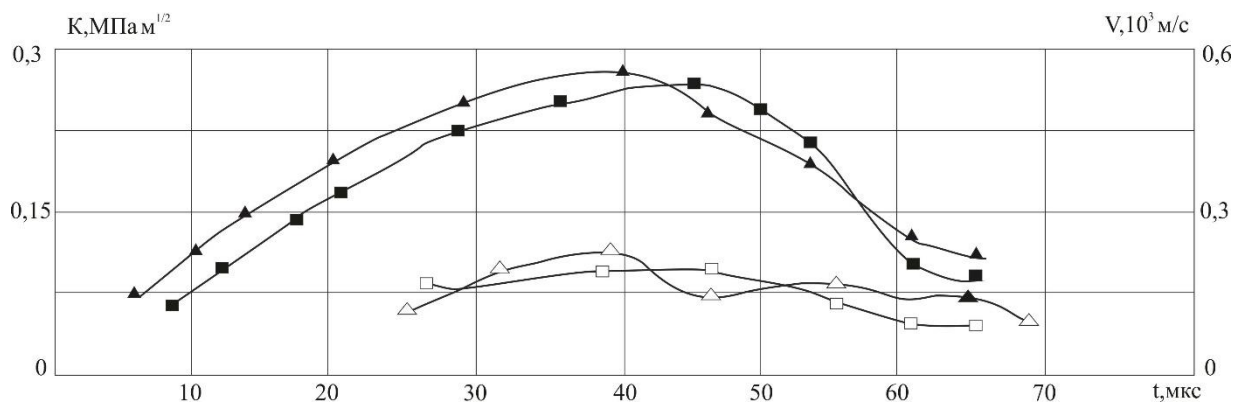


Рисунок 3.7 Зміна $K(t)$ (▲, ■) і $V(t)$ (□, △) в часі у зразку з вертикально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

В результаті експериментальних досліджень виявилася незначна залежність характеру руйнування від величини енергії заряду в електричних конденсаторах. На фотографії зруйнованих зразків, що перебуває справа, енергія руйнування $W=4,85$ КДж, тоді як для лівої - $W=4,70$ КДж рис. 3.8.

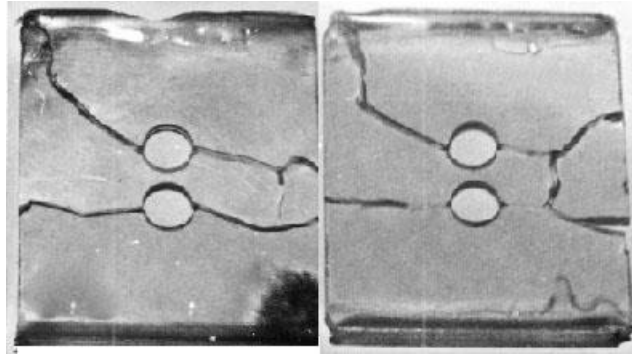


Рисунок 3.8 Вигляд зруйнованих зразків

Динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень досягав максимального значення $K(t) = 2,9K_c$ в одному випадку, та $K(t) = 2,8K_c$ - в іншому.

Отже, в результаті проведених експериментів, можна відзначити наступне: в зразках, які мають кілька перерізів з концентраторами напружень, руйнування виникає в одній частині пластини незалежно від того, що відбувається в інших її частинах; досягнення свого критичного значення динамічного коефіцієнту інтенсивності напружень $K(t)$ спричинює початок руйнування пластини.

3.4. Руйнування ортотропних пластин, які містять два отвори з радіальними тріщинами, що виходять на контур, при горизонтальному розміщенні отворів (нормальне навантаження) при імпульсному навантаженні

Зразок з горизонтально розміщеними круговими отворами, що мають по дві симетричні контурні тріщини (рис. 3.9).

При експериментальних попередніх дослідженнях відмітили відмінність в характері руйнування при динамічному і статичному навантаженні. Тому потрібно розглянути особливості динамічного руйнування даного зразка.

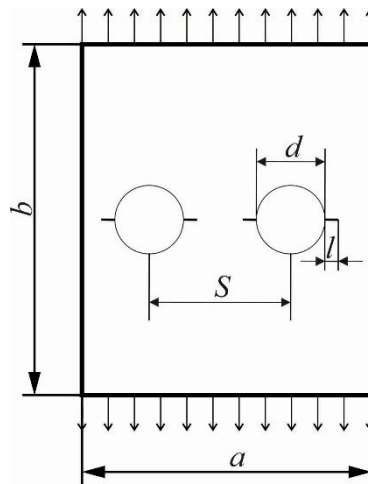


Рисунок 3.9 Зразок з горизонтально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

Розміри: $a = 90\text{мм}$; $b = 120\text{мм}$; $d = 15\text{мм}$; $l = 5,5\text{мм}$; $s = 50\text{мм}$.

В усіх зразках максимальні динамічні напруження виникали в області вершин тріщин, які розташовувалися між отворами. Для даної пластини фрагменти кінограми картин інтерференційних смуг показали, що руйнування починалось з розриву перетинки між отворами. Середня швидкість розриву перетинки між отворами становить $V = 700\text{ м/с}$. Причиною виникнення пружних поперечних S і релеївських R - хвиль, що змінили кривизну інтерференційних смуг довкола отвору, став імпульс розвантаження після розриву перетинки між отворами.

Наступний рух вершини тріщин в протилежні боки від отворів до вільного контуру пластини проходив майже синхронно. Зміни динамічного коефіцієнту інтенсивності напружень $K(t)$ і швидкості руху зовнішньої тріщини вершини $V(t)$ від часу приведені на рис.3.10. При виході на вільний контур зразку на графіку $V(t)$ є місце моменту повної зупинки тріщини ($t = 4-5\text{ мкс}$) з наступним зростанням її швидкості до $V = 650-700\text{ м/с}$. Руйнування зразку відбувалося при енергії, яка не перевищувала $W=4,3\text{ КДж}$. На рис.3.11 показано зовнішній вигляд зруйнованих зразків.

Отже, запропонована методика для визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень поляризаційно-оптичним методом в конструкційних зразках з тріщинами, може також успішно використовуватись при вивченні

динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень та особливостей руху вершин тріщин на зразках з концентраторами напружень у вигляді отворів і тріщин. Розвиток тріщини в усіх випадках відповідав основному закону росту квазікрихкої і крихкої тріщини (закону нормальних напружень), при якому рухома тріщина встановлюється перпендикулярно до максимального напруження, що діє в даний момент в її вершині. Відмічено суттєву різницю між руйнуваннями при статичних і імпульсних навантаженнях. Локалізовані перехідні напруження й деформації тіл при імпульсних навантаженнях не можуть існувати, так як у цих випадках руйнування можуть виникати в одній частині зразку незалежно від того, що відбувається в інших частинах пластини.

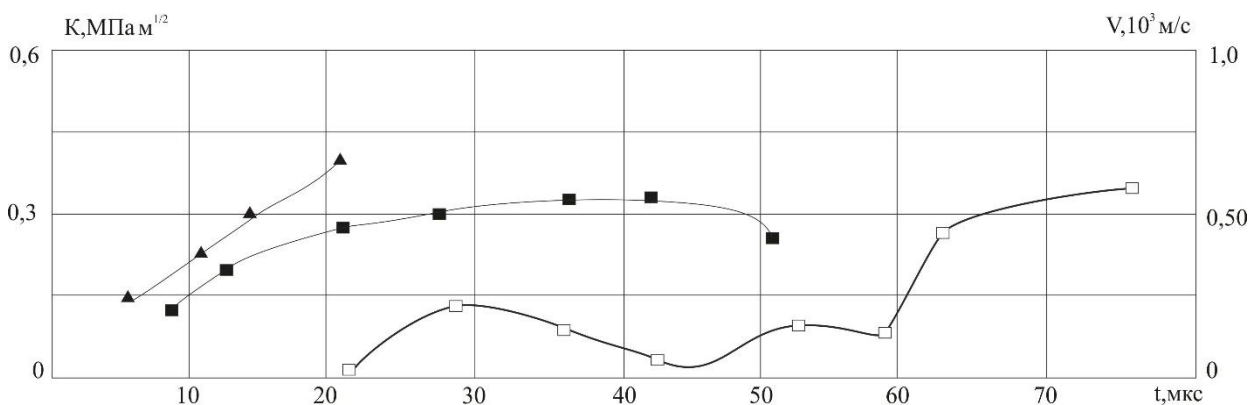


Рисунок 3.10 Зміна $K(t)$ ($\blacktriangle, \blacksquare$) і $V(t)$ (\square) в часі у зразку з горизонтально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

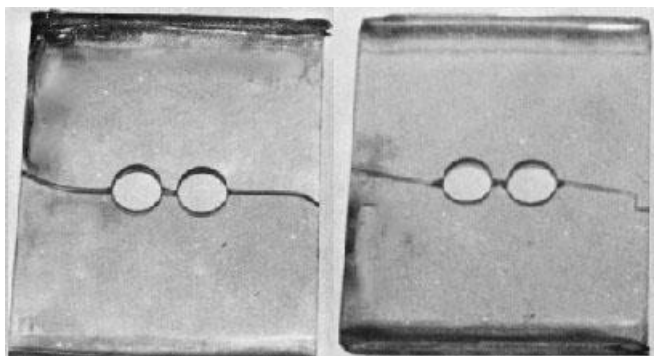


Рисунок 3.11 Зруйновані зразки з горизонтально розміщеними круговими отворами, що мають контурні тріщини

3.5. Висновки до розділу 3

Запропонована методика для визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень поляризаційно-оптичним методом в конструкційних зразках з тріщинами, може успішно використовуватись при вивченні динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень та особливостей руху вершин тріщин на зразках з концентраторами напружень у вигляді отворів і тріщин.

Відмічено суттєву різницю між руйнуваннями при статичних і імпульсних навантаженнях. Локалізовані перехідні напруження й деформації тіл при імпульсних навантаженнях не можуть існувати, так як у цих випадках руйнування можуть виникати в одній частині зразку незалежно від того, що відбувається в інших частинах пластини.

Одержано чисельні дані руйнування елементів конструкцій із склопластику, які містять геометричні концентратори. . Максимальні значення КІН становлять: 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 $K_I = 0,40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

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 $V = 320\text{-}340 \text{ (м/с)}$; для пластини з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною $V = 340\text{-}350 \text{ (м/с)}$. Значення максимальної швидкості для зразку з центральним круговим отвором і ізольованою тріщиною досягають $V = 600\text{-}610 \text{ (м/с)}$, а для пластини з центральним еліптичним отвором і ізольованою тріщиною – $V = 570\text{-}750 \text{ (м/с)}$.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

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

У розділі 1 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.

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

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

ізолюваною 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 $K_I=0,40 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.

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 ізолюваною тріщиною $V= 320\text{-}340$ (м/с); для пластини з центральним еліптичним отвором і ізолюваною тріщиною $V= 340\text{-}350$ (м/с). Значення максимальної швидкості для зразку з центральним круговим отвором і ізолюваною тріщиною досягають $V= 600\text{-}610$ (м/с), а для пластини з центральним еліптичним отвором і ізолюваною тріщиною – $V= 570\text{-}750$ (м/с).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малезик М.П., Підгурський М.І., Рудяк Ю.А., Федчишин Н.О., Підгурський І.М., Войтович Л.В. Дослідження методом динамічної фотопружності руйнування ортотропної пластини з круговим отвором та двома крайовими тріщинами за імпульсних навантажень //Фізико-хімічна механіка матеріалів. Том 55, №2, 2019. – С.112-116.
2. Леонід Войтович, Леонід Серілко, Олег Стрілець Дослідження напруженого стану біля симетричних горизонтальних тріщин на контурі отвору у в'язкопружній ортотропній пластині поляризаційно-оптичним методом. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : матеріали тез IV Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції 26–27 квітня 2023 р. [Електронне видання]. –Рівне : НУВГП, 2023. 12-13 с.
3. Леонід Войтович, Леонід Серілко Моделювання задач механіки руйнування ортотропних фотов'язкопружних пластин (склопластиків) з тріщинами. The IV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of practice and science and methods of their solution», January 31 – February 02, Milan, Italy. 2022. С. 628-630.
4. Robert C., Lampson Q. A stress-optic law for Photoelastic Analysis of ortotropic composites. "Experimental Mechanics". 10 (5), 1970.P. 210 – 215.
5. Alfirevic I. Photoelactik determination of the stress concentration faktors in anizotropic materials //Acta Technic. CSAV, 1969, 14, N2, -P.129 – 139.
6. Малезик М.П. Динамічна фотопружність анізотропних тіл.К.: ІГФ ім. Субботіна, 2001. 200 с.
7. Малезик М.П. Оптично-чутливі матеріали для моделювання хвильових полів напружень в анізотропних тілах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2004.№1.С.99 – 103.
8. Малезик М.П., Зубов В.І., Шеремет Г.П., Губар І.М. Еквівалентний анізотропний оптично-чутливий матеріал для виготовлення моделей волоконних композитів// Наукові вісті НТУУ „КПІ”. 2004.№ 1. С.86 – 93.

9. Рудяк Ю. Критеріальне оцінювання ресурсу полімерних елементів машин / Ю. Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2012. № 4(68). С. 88 – 91.
10. Божидарнік В.В. Критерії руйнування анізотропних пластин з тріщинами / В.В. Божидарнік // Моделювання, оптимізація, структурний аналіз і синтез технологічних комплексів, 2010. №2. – С. 3 - 7.
11. Божидарнік В.В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів: Монографія. Т.1, Т.2 / В.В. Божидарнік, О.Є. Андрейків, Г.Т. Сулим. Луцьк: Надстир'я, 2007. 824 с.
12. Гвоздюк М.М. Енергетичний підхід до оцінки гранично-рівноважного стану ортотропних тіл з тріщинами / М.М. Гвоздюк, О.В. Гембара // Мех. і фіз. руйнування буд. матер. та конструкцій. Львів: Каменярь, 2004. №5 – С.53-56.
13. Зражевський Г.М. Основи теорії міцності, деформації та механіки руйнування: навч. посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / Г.М. Зражевський, Т.Ю.Кепич, О.Г.Куценко. К.: ЛОГОС, 2005. 169 с.
14. Підгурський М.І. Прогнозування ресурсу роботи елементів рам самохідних бурякозбиральних комплексів на стадії росту втомних тріщин / М.І. Підгурський, М.Я. Сташків, П.В. Попович // Праці І-ї Міжнар. наук. техн. конф. «Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин». Тернопіль, 2004. С. 636 – 642.
15. Підгурський М.І. Циклічна тріщиностійкість і руйнування елементів зварних конструкцій / М.І. Підгурський, Т.І. Рибак // Праці 4 Міжнар. симпозіуму з трибофатики (SSTF4). Тернопіль: ТДТУ, 2002. Т.1. С. 290 – 295.
16. Про один підхід до оцінки довговічності твердих тіл. / О.П. Дацишин, Г.П. Марченко, А.Ю. Глазов та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2007. №4. С.47-52.
17. Шацький І.П. Граничний стан пластин та оболонки з тріщинами під комбінованим навантаженням / І.П. Шацький, В.В. Перепічка, М.В. Маковічук // В кн.: Механіка руйнування матеріалів і міцність

- конструкцій/ Під заг. ред. В.В Панасюка. Львів: Фіз.-мех. інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. С. 293-297.
- 18.Болейчук В. Оцінювання локального напруженого стану хаотично армованих склопластиків / В.Болейчук, Р.Гром'як, М.Стащук // Вісник Тернопільського національного технічного університету. № 4 (68). 2012. С. 42 - 52.
- 19.Зражевський Г.М. Основи теорії міцності, деформації та механіки руйнування: навч.посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / Г.М. Зражевський, Т.Ю.Кепич, О.Г.Куценко. К.: ЛОГОС, 2005. 169 с.
- 20.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.
- 21.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.
- 22.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.
23. Рудяк Ю.А. Математичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання / Ю.А.Рудяк // Вісник Хмельницького національного університету, 2012. № 6. С. 264 – 267.
24. Рудяк Ю. Фізичне обґрунтування методу дифузного поверхневого розсіювання/ Ю.Рудяк // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2013. № 1 (69) . С. 110 – 115.
- 25.Божидарнік В.В. Критерії руйнування анізотропних пластин з тріщинами/ В.В.Божидарнік // Моделювання, оптимізація, структурний аналіз і синтез технологічних комплексів, 2010. №2. С. 3 - 7.

26. Малежик М.П. Моделювання напружено-деформованого стану поблизу тріщин в анізотропних лінійно-в'язкопружних пластинах// Фіз. хім. механіка матеріалів.2003. №2. С. 93 – 95.
27. Малежик М.П. Визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень біля тріщин в ортотропних пластинах методом фотопружності. Допов. НАН України.2003. №11. С.45 – 48.
28. Chen Y.M. Numerical computation of dynamic stress intensity factor by lagrangian finite difference method. Eng. Frac. Mech.1975. 7: P. 653 – 660.
29. 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.
30. Войтович Л.В., Малежик М.П., Наконечний В.В. Фотопружне моделювання задач механіки руйнування ортотропних лінійно-в'язкопружних пластин з тріщинами// Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів: Інститут прикладних проблем механіки ім. Я. С. Підстригача НАН України. 2010. С. 357-359.
31. Войтович Л.В., Наконечний В.В. Дослідження напружено деформованого стану диску компресора турбіни методом фотопружності// Вісник Київського університету. Вип. 5. Серія. Фізико-математичні науки. Київ, 2003. с. 27 – 30.
32. Войтович Л.В., Наконечний В.В. Розподіл напружень біля підкріпленого кругового отвору в тонкій пластинці при розтягу// Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3(39) Частина 2. Рівне 2007. С. 41 – 44.
33. Войтович Л.В., Малежик М.П., Наконечний В.В. Концентрація напружень біля отворів в круглій пластинці стиснутій вздовж діаметра// Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3(47) Частина 2. Рівне 2009. С. 385-390.
34. 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.

35. 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.
36. Malezhik M.P., Voitovich L.V. Photoelastic Modeling of Problems in the Mechanics of Orthotropic Bodies /*International Applied Mechanics: Volume 50, Issue 6 (2014), Page 699-705.*
37. Зазимко Н.М, Малежик М.П., Шут М.І. Дослідження формування напружено-деформованого стану поблизу вершини тріщини в полімерній пластині при імпульсному навантаженні // *Наукові вісті НТУ „КПІ”*.2005. №2. С. 52 – 55.