

УДК 539.3

**В. Болейчук**

*Тернопільський національний економічний університет*

## **ОЦІНЮВАННЯ ОПІРНОСТІ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ РУЙНУВАННЮ З УРАХУВАННЯМ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА**

***Резюме.** Запропоновано теоретико-експериментальну методику оцінювання опірності руйнуванню полімерних матеріалів з урахуванням впливу агресивного середовища. Методика передбачає випробування зразків типу подвійна консольна балка з гострим надрізом. Старт тріщини реєструється за допомогою методу акустичної емісії. Враховано вплив агресивного середовища. Наведено дані експериментальних досліджень для полімерних матеріалів у нейтральному та агресивному середовищах.*

***Ключові слова:** композитний полімерний матеріал, подвійна консольна балка, акустична емісія, напружено-деформований стан, тріщина-надріз, тріщиностійкість, агресивне середовище.*

**V. Boleychuk**

## **ASSESSMENT OF RESISTANCE TO REINFORCED POLIMERIC MATERIALS FRACTURE WITH ACCOUNT OF CORROSIVE ATMOSPHERE**

***The summary.** Theory-experimental method is offered for the assessment of resistance to reinforced polymeric materials fracture with account for the effects produced by corrosive atmosphere. The method provides for testing the models of double sharp notched cantilever beam. The crack start is registered through the method of acoustic emission. The effect of corrosive atmosphere is taken into account. The outcomes are presented of experimental researches concerning polymeric materials in inert and corrosive atmosphere.*

***Key words:** composite polymeric material, double cantilever beam, acoustic emission, deflected mode, crack notch, crack resistance, corrosive atmosphere.*

**Постановка проблеми.** Відсутність надійних методів оцінювання характеристик опірності руйнуванню полімерних матеріалів не дозволяє проводити розрахунок несучої здатності трубопроводів, резервуарів та ін., а також визначити їх безпечний ресурс роботи. Тому основним завданням є розроблення методики визначення характеристик опірності полімерних матеріалів руйнуванню з урахуванням агресивного середовища, що є необхідним при визначенні несучої здатності та довговічності елементів конструкцій, виготовлених із полімерних матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Враховуючи, що при виготовленні композитних матеріалів мають місце дефекти у вигляді тріщин, які змінюють їх несучу здатність у процесі експлуатації, оцінювання міцності таких матеріалів здійснюють на основі підходів механіки руйнування. У працях [1, 2, 3] наведено результати досліджень із визначення міцнісних і деформаційних властивостей композитних матеріалів, а також характеристик тріщиностійкості.

**Актуальність та основні досягнення.** Сучасний розвиток літакобудування, хімічної та інших галузей промисловості передбачає широке використання армованих і полімерних композитних матеріалів як повноцінних заміників металевих матеріалів. Ці питання є актуальними для конструкцій, де визначальним стає зниження їх маси за високої питомої міцності, низької теплопровідності та підвищеної опірності руйнуванню в агресивних середовищах. Дослідження з даного напрямку висвітлено в монографіях [2, 4]. Тому застосування полімерних композитних матеріалів вимагає інтенсивного дослідження та достовірного визначення фізико-механічних

характеристик, розрахунку напружено-деформованого стану, розроблення методик визначення характеристик опірності руйнуванню. Важливішою задачею для роботи композитного матеріалу в агресивному середовищі є його оптимальний склад з точки зору опірності зародженню та поширенню тріщини [4].

**Мета роботи** – розроблення теоретико-експериментальної методики визначення характеристик тріщиностійкості армованих полімерних матеріалів з урахуванням дії силового навантаження й агресивного середовища.

**Методика та результати досліджень.** Визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень  $\hat{E}_Q$ , відповідного моменту старту тріщини в полімері для випадку узагальненого плоского напруженого стану, який є домінуючим у момент розкриття тріщини-надрізу, здійснюють за методикою, викладеною в роботі. Вибір даної методики визначений формою випробовуваного зразка (хаотично армований склопластик) – клиноподібний зразок типу подвійної консольної балки, що дозволяє проводити тривалі дослідження в умовах одночасної дії механічного навантаження, агресивного середовища, і підвищеної температури (рис. 1).

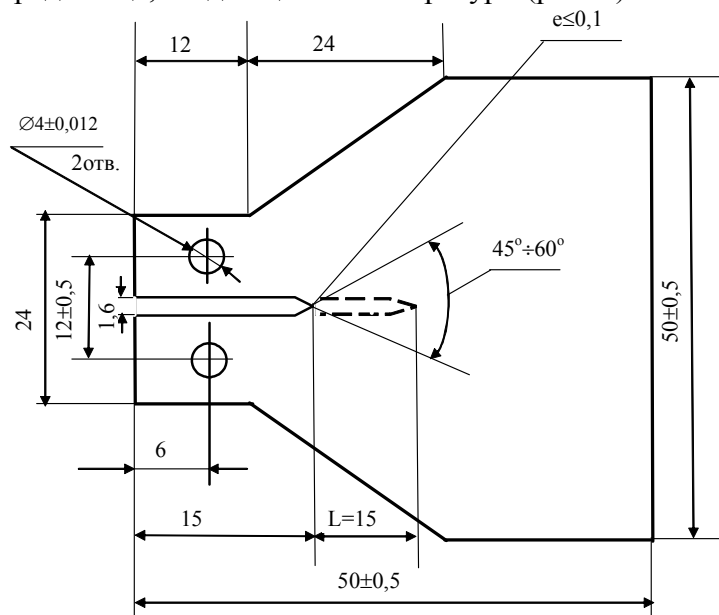


Рисунок 1. Клиноподібний зразок типу подвійної консольної балки: L – допустимий діапазон величини довжини вихідної тріщини-надрізу

Клиноподібний зразок розтягували на розривній машині при швидкості руху активного захвату 1+0,5 мм/хв. Похибка визначення сили не перевищувала 10% від вимірюваної величини.

Випробовування зразків проводили на універсальній випробовувальній установці FPZ-100 з максимальним зусиллям навантаження 100 кН.

В експериментах здійснювали автоматичну реєстрацію зусилля (P) і розкриття берегів тріщини (V) через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) на персональний комп'ютер (ПК). У результаті проведених досліджень зразків різного ступеня армування отримано типові діаграми «навантаження–зміщення», які зображено на рисунку 2. В чистих неармованих склопластиків процес розкриття тріщини-надрізу при навантаженні переходить у процес нестабільного поширення тріщини (рис. 2а) у момент досягнення зусилля  $P_0 = P_Q$  з наступним падінням зусилля розтягу до нуля. В малозаповнених дискретним армованим компонентом склопластиках (до 10 ваг. %) процес розкриття тріщини-надрізу супроводжується традиційним «стрибком» на кривій «зусилля–переміщення» (рис. 2б). Для склопластиків, із умістом армованих компонентів  $\geq 30\%$ , розкриття тріщини-надрізу практично не позначається на характері діаграми «зусилля–переміщення» (рис. 2в).

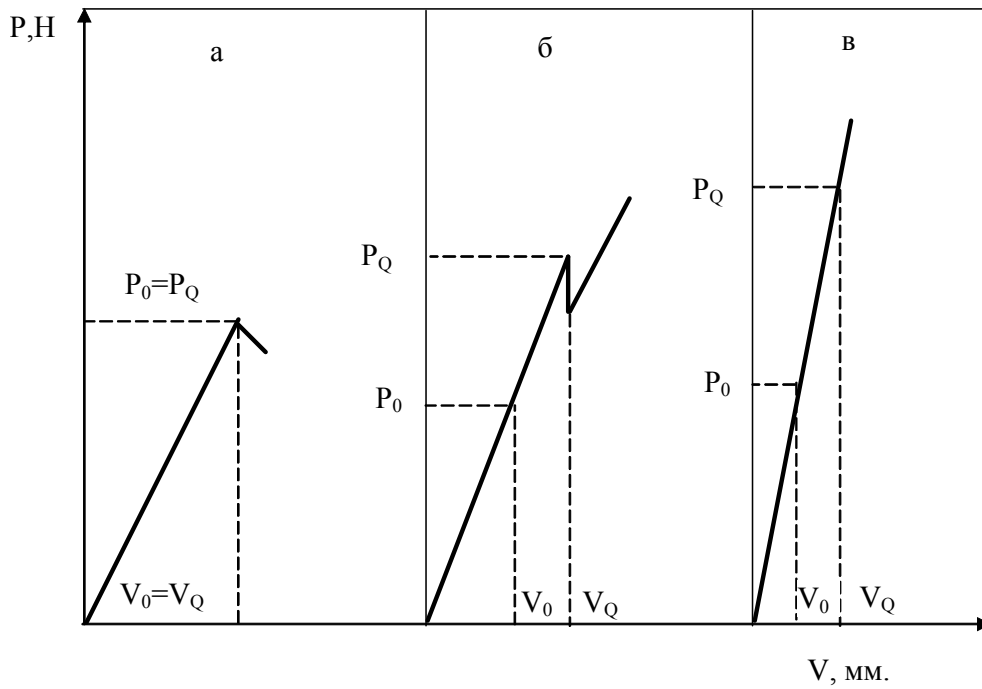


Рисунок 2. Типові криві «зусилля–переміщення» для хаотично армованих склопластиків: а – поліефірна смола ПН-15; б – ПН-15+ЛВВ-СП; ПН-15+МПС; ПН-15+Лавсан; в – ПН-15+МБ; ППМ-15-СХ; ПСК-15-СХ

Для визначення моменту граничного розкриття тріщини-надрізу, яке відповідає початку руйнування, запропоновано паралельно з записом кривої «зусилля–переміщення» проводити реєстрацію в реальному масштабі часу диференційних та інтегральних параметрів акустичної емісії (АЕ) (рис. 3).

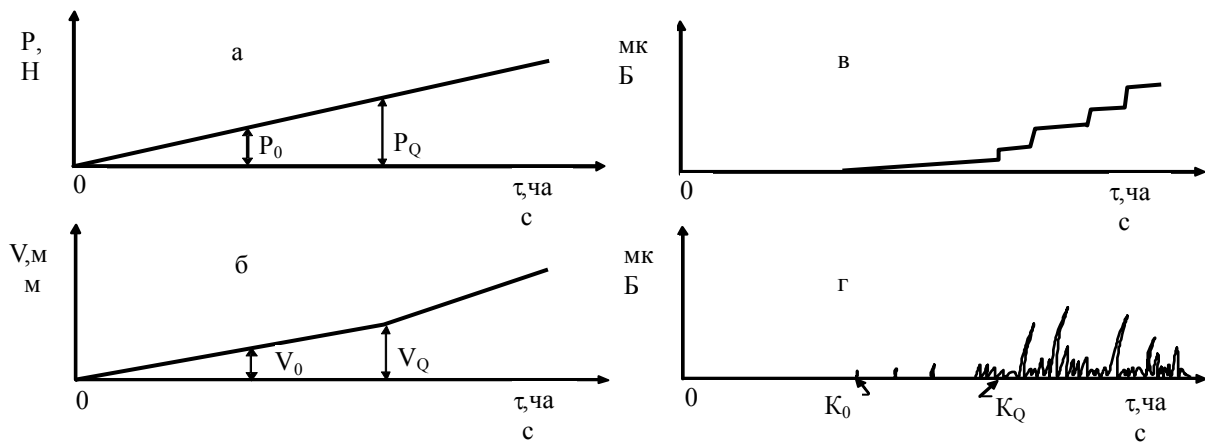


Рисунок 3. Синхронний запис: а – зусилля (P), б – зміщення (V), в – суми імпульсів АЕ, г – сигналів акустичної емісії

Реєстрація сигналів акустичної емісії проводилась комплексом апаратури, який дозволяв здійснювати запис сигналів АЕ.

Основні параметри апаратури:

- робоча лінія частот, кГц . . . . . 100-2000
- чутливість, мкВ . . . . . не менше 3
- динамічний діапазон, дБ . . . . . 60
- постійна часу детектора рівня сигналу АЕ, с . . . . . 0,1
- частота зрізу ФВЧ, кГц . . . . . 100, 300, 700, 1200

- частота зрізу ФНЧ, кГц . . . . . 300, 700, 1200, 2000

Апаратура акустичної емісії включає ряд нестандартних електронних блоків, а також АЦП і ПК, лічильник імпульсів (частотомір) Ч-3-34.

Функціональна схема, яка пояснює методику експерименту й апаратурне оформлення, зображена на рисунку 4.

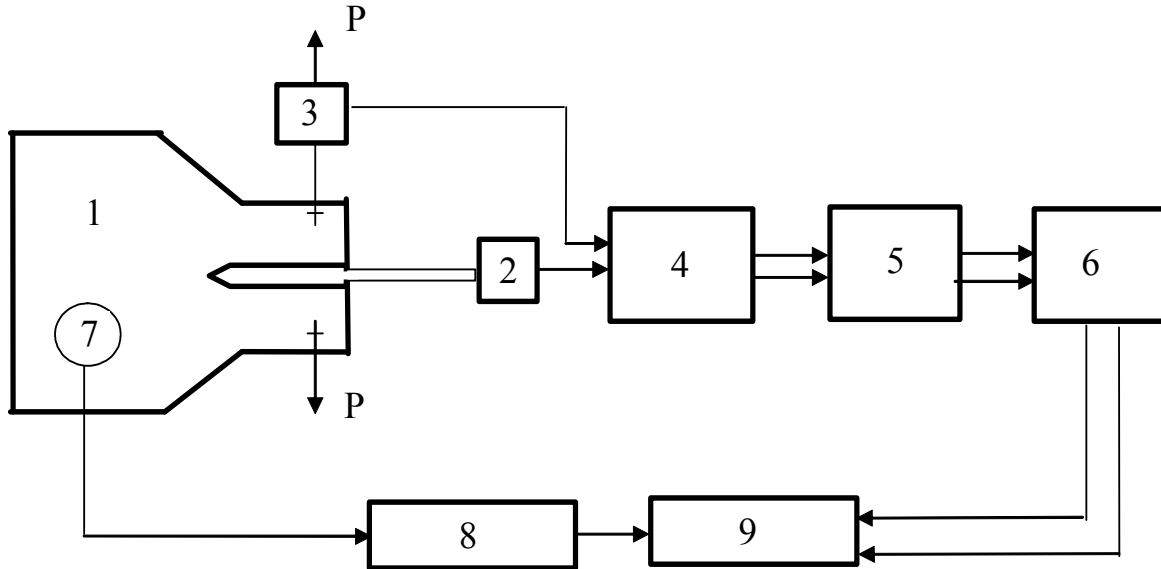


Рисунок 4. Схема апаратурного оформлення методики: 1 – зразок; 2 – датчик переміщення; 3 – динамометр Р-01; 4 – підсилювач 8АНЧ-7М; 5 – АЦП; 6 – ПК; 7 – перетворювач АЕ; 8 – регістратор сигналів АЕ; 9 – блок обробки

Сигнали акустичної емісії сприймалися вимірювальним перетворювачем і посилювалися широколінійним підсилювачем ( $K=60$  дБ) на лінії частот, які відповідають основній резонансній частоті вимірювального перетворювача.

Потрапляючи на блок обробки, сигнал через підсилювач відеоімпульсів подається на блок вимірювання рівня сигналів АЕ і на три ідентичних канали вимірювальної активності. Блок вимірювання рівня сигналу являє собою детектор, вихідна напруга якого пропорційна середньоквадратичному значенню вхідних сигналів за час 0,1 с. Блок вимірювання активності складається з послідовно з'єднаних компараторів з регулюючим порогом спрацювання, формування нормальних імпульсів, усередненого підсилювача і пристрою обмеження. Він забезпечує перетворення вхідної послідовності сигналу зі змінною напругою, рівень якого пропорційний активності сигналу АЕ.

Перемикання діапазону вимірювання активності проводиться котушкою десятичних поділок, яка зменшує частоту сигналів, що надходять на усереднений підсилювач. Нормалізовані імпульси виводяться на зовнішній лічильник. Генератор реєструє імпульсну послідовність для налаштування і калібрування апаратури.

Реєстрація сигналів ведеться в діапазоні частот 200-400 кГц. Для усунення сторонніх механічних шумів проводять контрольні навантаження клиноподібних зразків без тріщини-надрізу зусиллям, яке у два рази перевищує критичне значення, при якому відбувається граничне розкриття тріщини.

Експериментальним шляхом було встановлено, що мінімальна амплітуда імпульсу АЕ, пов'язаного з початком процесів мікроруйнування досліджуваних композитів, складає 50 мкВ. Імпульси з амплітудою 10 мкВ відносяться до

флюктуаційних шумів. Сигнали акустичної емісії з амплітудою менше 100 мкВ відповідають процесу кінетики нагромадження субмікротріщин в околі вершини-надрізу і підготовки останньої до старту.

За розкриття фронту тріщини-надрізу приймається момент появи характерного «стрибка» на діаграмі «зусилля–переміщення». За відсутності вказаного «стрибка» за граничне розкриття тріщини-надрізу приймається момент появи сигналу АЕ, який перевищує рівень 150 мкВ.

Підтвердження відповідності сигналу АЕ початку розкриття тріщини-надрізу здійснювалося на контрольних зразках шляхом одночасної реєстрації моменту розкриття чотирма методами: оптичним, рентгеноскопичним, записами діаграм «зусилля–переміщення» і записами диференційної та інтегральної діаграм сигналів акустичної емісії.

Припускаючи, що процес мікроруйнування композиту відповідає процесу зародження мікротріщин, позначимо коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), який відповідає цьому процесу, через  $K_0$ .

При встановленні на діаграмі «зусилля–переміщення» моментів виникнення перших сигналів АЕ і розкриття тріщини-надрізу визначаються величини  $K_0$  і  $K_Q$  за співвідношеннями

$$K_0 = \sqrt{\frac{P_0 E V_0}{2bl}}; \quad K_Q = \sqrt{\frac{P_Q E V_Q}{2bl}}, \quad (1)$$

де  $P_0$  і  $P_Q$  – навантаження відповідно в момент першого сигналу АЕ і розкриття тріщини;

$V_0$  і  $V_Q$  – розкриття берегів тріщини відповідно в момент першого сигналу АЕ і критичного розкриття тріщини;

$b$  – товщина зразка в околі вершини тріщини-надрізу;

$l$  – висхідна довжина тріщини-надрізу.

У таблиці 1 наведено дані в'язкості руйнування поліефірної смоли ПН-15 і композитів на його основі, які отримані за вищеписаною методикою, а також із застосуванням методу АЕ.

Таблиця 1. Дані тріщиностійкості композитних матеріалів у лабораторних умовах

Композит	Вміст армованого компонента, вага %	За методом АЕ		Без методу АЕ	
		$K_Q$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Коефіцієнт варіації, %	$K_Q$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Коефіцієнт варіації, %
ПН-15	-	19,1	9,0	19,1	9,0
ПН-15+Лавсан	10	28,0	12,1	28,0	12,1
ПН-15+МПС	10	30,5	11,9	30,5	11,9
ПН-15+ЛВВ-СП	10	32,3	13,6	32,3	13,6
ПН-15+МБ	30	67,5	14,3	72,0	16,3
ПН-15+УТМ-8	50	110,2	14,0	118,2	14,9
ПСК-15-СХ	50	101,0	14,8	114,2	16,1
ППМ-15-СХ	50	127,3	15,1	141,4	18,0

У таблиці 2 наведено значення  $K_0$  і  $K_Q$  композитних матеріалів на основі поліефірної смоли ПН-15.

Таблиця 2. Дані  $K_0$  і  $K_Q$  композитних матеріалів у лабораторних умовах

Композит	$K_0$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Коефіцієнт варіації, %	$K_Q$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Коефіцієнт варіації, %
ПН-15	19,1	9,0	19,1	9,0
ПН-15+Лавсан	28,0	12,1	28,0	12,1
ПН-15+МПС	16,0	12,3	30,5	11,9
ПН-15+ЛВВ-СП	13,3	9,2	32,3	13,6
ПН-15+МБ	9,4	11,4	67,5	14,3
ПН-15+УТМ-8	47,0	11,1	110,2	14,0
ППМ-15-СХ	65,0	14,4	127,3	15,1

Співставлення отриманих характеристик тріщиностійкості композитів показує, що оцінка  $K_Q$  без застосування методу АЕ матеріалів, пружно-міцнісні властивості яких практично не змінюються в момент старту тріщини-надрізу, призводить до завищення результатів на 6,7–11,1% порівняно з даними, отриманими з використанням методу АЕ.

Характерні записи сигналу АЕ в процесі навантаження зразків зображено на рисунку 5а, б.

Для випадків руйнування (рис. 5а), коли відсутні низькоамплітудні високочастотні сигнали, справедливо оцінювати гранично-рівноважний стан таких композитів за величиною критичного зусилля  $P_Q$ , що відповідає діаграмі навантаження, зображеної на рисунку 2а. Наявність низькоамплітудних високочастотних сигналів (рис. 5б) вказує на субкритичне підростання тріщини в зоні передруйнування (її галуження) і оцінювання гранично-рівноважного стану необхідно проводити за величиною  $P_Q$ , що відповідає умовам руйнування за діаграмою, зображеною на рисунку 2б [5].

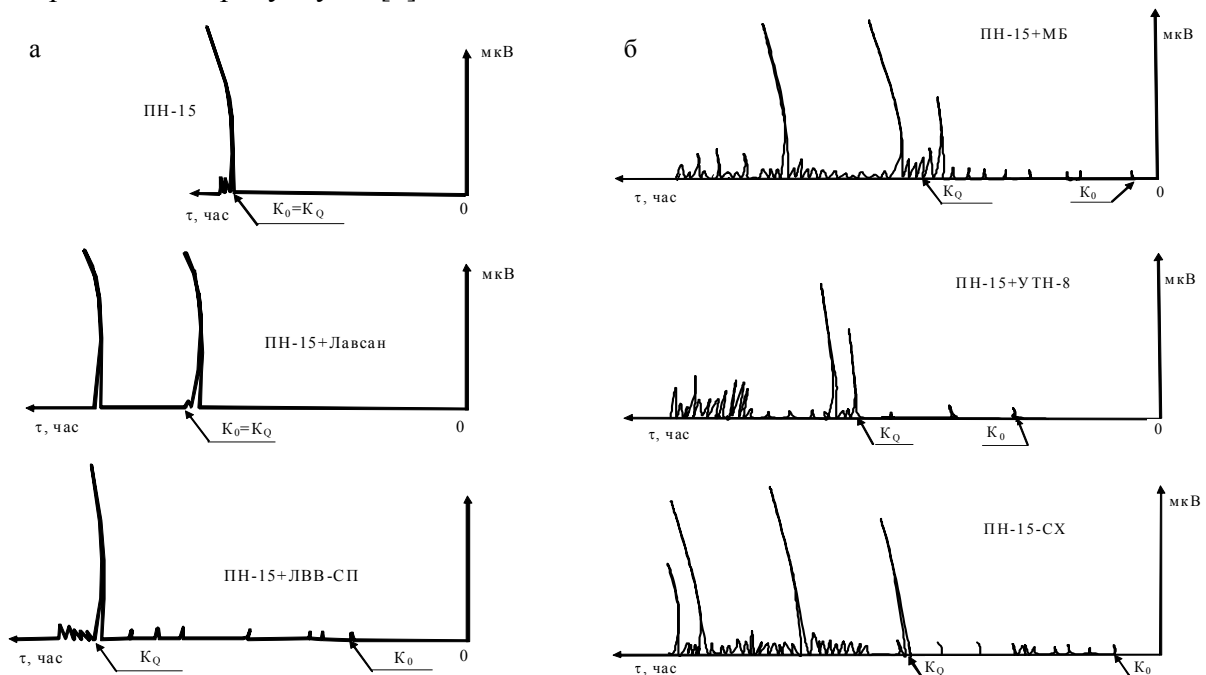


Рисунок 5. Характерні сигнали АЕ при руйнуванні зразків із композитних матеріалів

Для оцінювання впливу експлуатаційних факторів, зокрема середовища, на тріщиностійкість композитних матеріалів розроблено й виготовлено стенд для випробування клиноподібних зразків в агресивних середовищах при фіксованому значенні навантаження і температури (рис. 6).

Стенд являє собою блок, який складається із восьми секцій, встановлених на загальній рамі. В кожній секції є шість самостійних безпосередньо навантажувальних пристроїв з граничним зусиллям 100 Н.

При визначенні діапазонів навантажень для випробувань на довготривале статичне навантаження основним критерієм є значення в'язкості руйнування випробовуваних композитних матеріалів у лабораторних умовах.

В якості висхідних рівнянь навантаження ( $P_H$ ) вибрано два рівні –

$$P_H = 0,1P_Q \text{ і } P_H = 0,3P_Q. \quad (2)$$

Постійність температури агресивного середовища забезпечується терморегулятором РТ-0102.

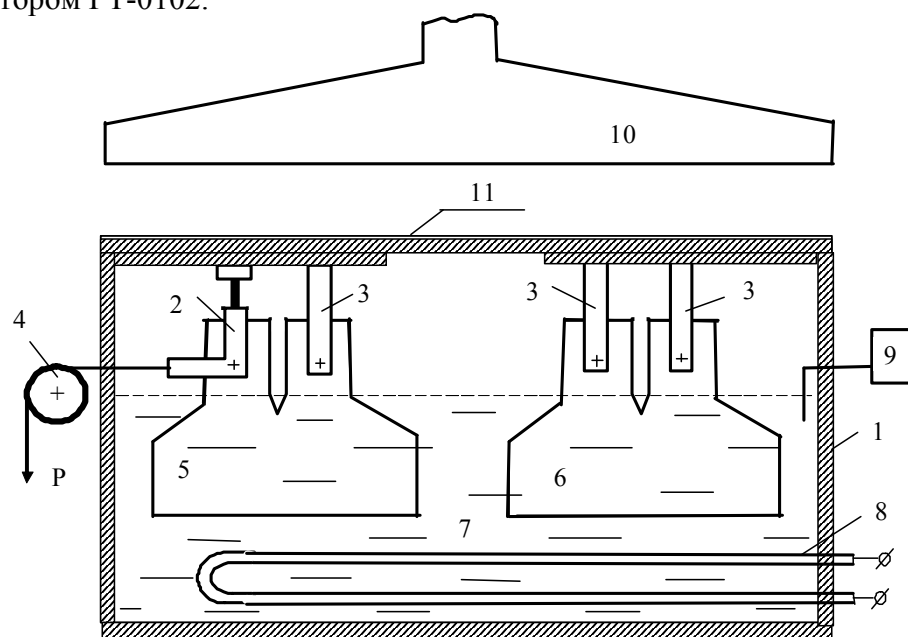


Рисунок 6. Стенд для експонування зразків склопластиків в агресивному середовищі при завищених температурах у напруженому й ненапруженому станах: 1 – корпус ванни; 2 – рухомий захват; 3 – нерухомий захват; 4 – навантажувальний пристрій; 6 – зразок склопластику під навантаженням; 7 – зразок склопластику в ненапруженому стані; 7 – агресивне середовище; 8- ТЕН; 9 – регулятор температури стенда РТ-0102; 10 – зонд вентиляції; 11 – кришка

Одночасний вплив агресивного середовища і температури на тріщиностійкість композитних матеріалів проводили у дистильованій воді, 5% розчині HCl і 10% NaOH при температурах 293 K°, 323 K° і 353 K°. Згідно з методикою зразки навантажували зусиллям, яке створювало у зразку біля концентратора напружено-деформований стан, що визначається КІН –  $K_{QX}$ . Після витримування зразків у середовищі протягом часу  $t$  (місяці) визначили критичну величину КІН –  $K_{QX_t}$ . Характеристики тріщиностійкості для композитного матеріалу ПН-15+ЛАВСАН наведено у таблиці 3.

Аналіз результатів показує, що максимальне зниження величини  $K_Q$  у середовищі води спостерігається при температурі 353 K°, яке становить близько 50% від початкового. Аналогічне зниження спостерігається при такій же температурі для середовища 5% HCl.

Оскільки зменшення величини  $K_Q$  є значним, то при розрахунку довговічності елементів конструкцій, виготовлених із композитних матеріалів, необхідно врахувати умови та склад робочого середовища.

Таблиця 3. Тріщиностійкість композитних матеріалів після витримування в агресивних середовищах при підвищених температурах

Композит	$K_{QX_0}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Темпе- ратура, К°	Середовище	$K_{QX_t}$ , після витримування, Н/мм <sup>3/2</sup>			
				Час витримування, місяці			
				3	6	9	12
1	2	3	4	5	6	7	8
ПН-15 + ЛАВСАН	28,0	293	Вода	26,4	24,3	23,0	21,2
	28,0	293	5% HCl	22,2	19,7	18,5	19,0
	28,0	293	10%NaOH	17,4	15,4	13,8	12,5
	28,0	323	Вода	23,0	19,0	17,8	15,8
	28,0	323	5% HCl	21,8	19,0	18,3	18,0
	28,0	323	10%NaOH	16,3	14,1	11,0	9,6
	28,0	353	Вода	20,5	18,0	16,0	14,3
	28,0	353	5% HCl	21,5	18,4	16,0	14,3
	28,0	353	10%NaOH	14,8	12,6	10,0	8,3

**Висновки.** Розроблена методика оцінювання параметрів тріщиностійкості армованих полімерних матеріалів з позиції лінійної механіки руйнування і з використанням методу акустичної емісії дозволила не тільки підвищити точність при визначенні в'язкості руйнування, але й уперше експериментальним шляхом кількісно оцінити здатність матеріалу чинити опір зародженню в ньому тріщини з урахуванням впливу різних експлуатаційних факторів. Показано, що максимальне зменшення тріщиностійкості композитних матеріалів (ПН-15+ЛАВСАН) до 50% спостерігається при температурі 353 К° у середовищі HCl.

#### Література

1. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці / [Джур Є. О., Кучма Л. Д., Манько Т. А. та ін.]. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.
2. Механіка композитів: в 12 т. / под. общ. ред. А. Н. Гузя. – К. : Наук. думка, 1993. – Т. 1: Статика матеріалів / под ред. В. Т. Головчана. – 1993. – 455 с.
3. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей. Определение характеристик трещиностойкости композиционных материалов при статическом нагружении: метод. рекомендации. – Львов : Изд. ФМИ, 1984. – 78 с.
4. Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів / Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. – Луцьк: Надстир'я, 2007. – Т.1: Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів, 400 с.
5. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении; [Розрахунки і випробовування на міцність. Методи механічних випробовувань металів. Визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) за статичного навантаження].

Отримано 11.10.2010