

УДК 539.3; 620179.17

**З. Назарчук, академік НАНУ, докт. фіз.-мат. наук, професор;  
В. Скальський, докт. техн. наук, професор**

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
Національної академії наук України, м. Львів*

## **МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДОКРИТИЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ СКЛОВОЛОКОННИХ КОМПОЗИТІВ**

***Резюме.** Об'єктом досліджень слугують процеси зародження та розвитку мікро- та макротріщин в об'ємі композиту і пружні динамічні поля, які при цьому виникають. Статтю присвячено створенню методологічних основ ефективного акустико-емісійного діагностування докритичного розтріскування таких матеріалів за зміною параметрів пружних хвиль, що породжуються різними механізмами руйнування.*

***Ключові слова:** скловолокно, композит, матриця, напруження, тріщина, руйнування, акустична емісія.*

**Z. Nazarchuk, V. Skalskyi**

## **METHOD OF ASSESSMENT OF SUBCRITICAL CRACKING OF GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES**

***The summary.** The object of this study are processes of nucleation and growth of micro- and macrocracks inside a composite material and the corresponding elastic dynamic fields. The paper is devoted to the development of the scientifically grounded methodological fundamentals for the effective acoustic emission diagnostics of subcritical crack dynamics of such materials incorporating the variation of the parameters of the elastic waves that are related to the different mechanisms of their generation.*

***Key words:** glass fiber, composite material, matrix, stress, crack, fracture, acoustic emission.*

**Актуальність проблеми.** Потреба людства у нових конструкційних матеріалах росте так швидко, що темпи вивчення властивостей нових матеріалів практично не встигають за їх створенням. Особливо це стосується композитних матеріалів (КМ), які завдяки появі нових високоміцних волокон із низькою питомою вагою та високими питомою міцністю, що суттєво вища, ніж в алюмінієвих сплавів та сталей, корозійною, хімічною, тепло-, вогне- і вологостійкістю; добрими термічними та електричними властивостями тощо знайшли широке застосування в усіх сферах життєдіяльності людини. Розвиток світового виробництва КМ призвів до того, що зараз не існує області техніки чи сфери науки та господарювання, де б не застосовували ці матеріали. Особливо широко КМ використовують у судно- та машинобудуванні, авіакосмічній техніці, хімічній промисловості, житловому та промисловому будівництві, військовій промисловості тощо.

Можливість вибирати орієнтацію волокон та комбінувати їх різні типи у взаємозв'язку із підбором матеріалу матриці дає змогу створювати сьогодні КМ із кращими міцнісними та пружними властивостями. Необхідно зазначити, що найпоширенішими серед них є скловолокна, оскільки їх собівартість найнижча. Це й зумовило найбільше застосування скловолоконних КМ у зазначених вище технічних сферах. Однак щодо міцнісних характеристик скловолоконних композитів, то необхідно наголосити, що вони суттєво різні для різних типів армуючої компоненти й матриці. Тому актуальність проблеми дослідження міцнісних властивостей та тріщиностійкості таких КМ важко переоцінити, оскільки вони ще детально не вивчені.

У світовій практиці у сферах застосування скловолоконних композитних матеріалів на сьогодні не існує загальноприйнятих методів визначення характеристик їх статичної тріщиностійкості. Пов'язано це з проблемами визначення стадій макроруйнування таких композитів, що можуть бути зумовлені різними чинниками: відшаруванням волокон від матриці, руйнуванням матриці та й самих волокон, витягуванням останніх тощо. Для вивчення цих процесів і з метою їх ефективного виявлення останнім часом все більше використовують явище акустичної емісії. З цією метою використовують низку параметрів сигналів акустичної емісії для отримання необхідної інформації та інтерпретування результатів наукових досліджень.

Як показує світова практика, визначення стадій розтріскування композитів, а особливо динаміки його розвитку, перебуває на етапі становлення. Ось чому проведені у роботі дослідження спрямовані на розв'язання актуальної для низки галузей промисловості України науково-технічної задачі – розроблення ефективних прикладних методик кількісного оцінювання параметрів докритичного розтріскування скловолоконних композитних матеріалів.

Перспективним напрямком неруйнівного контролю й технічної діагностики для визначення об'ємної пошкодженості композитів є метод акустичної емісії (АЕ) [1]. Однак методик його застосування у літературних джерелах на даний час є обмаль. На часткове вирішення окресленої проблеми спрямовані дослідження, викладені у цій праці.

**Стан проблеми.** Одним із найпоширеніших напрямків визначення пошкодженості є підхід, що ґрунтується на деяких апріорних характеристиках пошкодженості, котра визначається порівнянням теоретичних і експериментальних даних. Наприклад, запропоновано пошкодженість описувати скаляром  $\psi$  ( $1 \geq \psi \geq 0$ ) – „суцільність” [2]. У початковому стані за відсутності пошкодженості  $\psi = 1$ , а в часі функція  $\psi$  спадає і введено функцію  $\omega \geq 0$  ( $\omega = 1 - \psi$ ), яку названо пошкодженістю. Надають функції  $\psi$  статистичний зміст і тоді зміну суцільності описують кінетичним рівнянням виду

$$\frac{d\psi}{dt} = F(\psi, \dots), \quad (1)$$

де  $F$  залежить від  $\psi$  та деяких інших змінних: тензора напружень чи деформацій, температури, часу тощо. Суттєво, щоб функції та параметри в рівнянні (1) визначались із простих експериментів. Важливим є встановлення принципу лінійного сумування пошкоджень, котрий вперше постульовано у праці [3].

Відомі також інші схеми побудови континуальних моделей накопичення пошкоджень. Теорія довготривалої міцності вводить поняття пошкодження  $\Pi$  (його компоненти  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ ), що характеризує накопичення дефектів і залежить від історії навантаження даного елемента середовища [4]. Передбачають невід'ємні міри пошкоджень

$$M_j(\Pi), j=1, 2, \dots, m; m \leq n. \quad (2)$$

Руйнування проходить, коли для будь-якого  $j=k$

$$M_k(\Pi) = c_k, \quad (3)$$

де  $c_k$  – константи матеріалу. У спрощеному варіанті пошкодження  $\Pi$  є симетричним тензором другого рангу.

У [5] пошкодженість матеріалу в околі точки характеризують розподілом дефектів – м/т на малій сфері, що оточує дану точку і вводиться відповідна функція на сфері, для якої записано кінетичне рівняння. Накопичення розсіяних мікродефектів моделюється зростанням у матеріалі включень із іншими пружними властивостями. Можна визначити пружні характеристики такого композитного середовища залежно від концентрації включень і від пружних властивостей основного матеріалу та включень.

Виходячи зі співвідношень термодинаміки необоротних процесів, автори виводять кінетичне рівняння для функції концентрації. Така схема дозволяє розглядати руйнування за повзучості, малоциклової втоми, впливу складного навантаження тощо.

Наприклад, у для описування механічної поведінки матеріалу із тріщиною застосована мікромеханічна модель руйнування, яка ґрунтується на відомому критерії Гурсона-Твергаарда-Нідлемана пластичного течіння для пористого матеріалу. Дана модель вбудована в розрахункову програму із використанням методу кінцевих елементів. Знаючи критичні експериментальні величини мікромеханічних параметрів пошкоджуваності чисельними розрахунками гладких зразків завбачено початок пластичного руйнування компактного зразка із тріщиною. На прикладі низьколегованої сталі з ємності високого тиску показано, що цю модель можна використати для прогнозу початку руйнування гладких зразків.

Однак ефективних методів кількісного оцінювання пошкодженості матеріалу під впливом навантаження, а особливо в області його пластичних деформацій, за допомогою неруйнівних методів контролю на даний час не знайдено. Не вироблено єдиної думки щодо найінформативнішого методу оцінювання об'ємної пошкодженості матеріалу. Залежно від вибраного параметра, якому ставиться у відповідність міра пошкодженості й спосіб її інтерпретування, отримують різні її значення.

**Мета роботи** – розробити методику оцінювання об'ємної пошкодженості методом АЕ скловолоконного композиту, армованого склотканиною, на різних стадіях розвитку в ньому макроруйнування.

**Результати експериментальних досліджень.** Застосували модель кількісного оцінювання об'ємної пошкодженості матеріалу, яка враховує лінійність накопичення пошкоджень у твердому тілі [2]. Основні її положення такі:

1. Механічна міра об'ємної пошкодженості матеріалу  $\xi$  визначається як відношення суми площ новоутворених дефектів  $S_i$  до об'єму, де вони утворилися  $V$ :

$$\xi = \sum S_i / V = S / V. \quad (4)$$

2. Величина  $\xi$  лінійно пропорційна справжній деформації  $e$  полікристалічних тіл.

3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості матеріалу  $\xi_1$  визначається відношенням суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, де відбувається дефектоутворення.

4. Ця міра об'ємної пошкодженості матеріалу  $\xi_1$  лінійно залежить від справжньої деформації полікристалічних тіл.

5. Обидві міри об'ємної пошкодженості взаємно пропорційні.

**Методика проведення випробувань.** В експериментах використовували скловолоконний композит, сформований так. У форму наносили спочатку декоративний шар гелькоуту. До нього додавали шар склотканини, яку покривали шаром смоли із затверджувачем, тоді знову наносили склотканину зі смолою та затверджувачем. Так набирали необхідну товщину склопластику. В нашому випадку вона становила 4 мм. Спочатку випробовували плоскі зразки із згаданого вище скловолоконного композиту, а потім з інших матеріалів. Їх розтягували на розривній машині СВР-5 [1] зі швидкістю переміщення рухомого затиску  $4 \times 10^{-7}$  м/с. Щоб додатково виключити вплив генерування сигналів АЕ (САЕ) від затисків машини на результати досліджень, зразки попередньо навантажували зашунтованими у спеціальній оправці, використовуючи ЕК [1]. Крім того, для уникнення впливу завад, які проходять мережею живлення, застосовували метод паралельного (індикаторного) каналу [6]. Після зняття оправки на розміщеному в затисках машини зразку встановлювали первинний перетворювач АЕ (ПАЕ), із якого електричні сигнали подавали на попередній підсилювач системи відбору та опрацювання САЕ типу SKOP-8 (розробка ФМІ НАН України, так само як установка СВР-5). Аналогові сигнали від перетворювачів сили і видовження зразка надходили на відповідні низькочастотні

канали системи, де вони оцифровувалися, оброблялися і зберігалися на жорсткому дискові персонального комп'ютера типу Notebook.

Так отримували синхронний запис САЕ і характеристик навантаження зразків, за якими оперативно можна було слідкувати на екрані монітора в реальному часі. Для усіх зразків місце встановлення ПАЕ, режими відбору, підсилення та опрацювання САЕ були незмінними. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 70 дБ (40 дБ – попередній підсилювач) у смузі пропускання 0,2...1,0 МГц, яка визначалася амплітудно-частотною характеристикою ПАЕ.

**Розрахунок напружень в елементі скловолоконного КМ, армованого за різними напрямками укладання волокон.** Величезна кількість різних дефектів волокон впливає на механізм руйнування. Борні волокна, наприклад, схильні до радіального розтріскування. Кожне волокно неминуче містить дефекти різних розмірів у деяких точках уздовж його осі. Можливо, що в усіх композитах волокна мають внутрішні залишкові напруження, які виникли під час з'єднання волокон і матриці в одне ціле. Оцінювання внесків цих недосконалостей у руйнування слід здійснювати послідовно або за допомогою деякої моделі руйнування, що враховує їхній сумісний вклад.

Модулі Юнга й зсуву волокон великою мірою визначають їхнє успішне застосування у композитах. Після першого вдалого використання волокон Е-скла основну увагу спрямували на створення й використання твердіших матеріалів на основі бору й вуглецю з модулями Юнга від 387 до 424 ГПа. Причина зацікавлення високомодульними матеріалами полягає у можливості підвищення ефективності конструкції, зокрема для стиску, завдяки збільшенню модуля пружності матеріалу без збільшення його питомої ваги. Варто звернути увагу на фактори, що викликають занепокоєння: підвищення твердості означає, що задане напруження виникає у волокні за меншої деформації, так що порушується підібране для склопластику співвідношення між граничними міцністю та деформацією волокон і матриці; передавання навантаження через прошарок матриці між волокнами через зсув у матриці викликає зсувні напруження у матриці та на границі розділення волокно – матриця, що залежать від модуля пружності.

Однією з найдискусійніших областей механіки руйнування композитів є дослідження ролі поверхневого оброблення волокон, що можна проводити як до, так і під час отримання композиту, а також вивчення поверхні розділу між волокном і матрицею.

Таким чином, один із найважливіших етапів прогнозування міцності композитів – це визначення напружено-деформованого стану в зонах найбільшої ймовірності зародження та розвитку руйнування. У даній роботі зроблено спробу на основі методу скінченних елементів визначити напружений стан у деяких видах композитів, армованих прямолінійними стрижнями (волокнами), під навантаженням розтягу-стиску.

Розглянемо зразок композитного матеріалу, виготовленого на основі епоксидної смоли (матриця) та армованого прямолінійними волокнами із Е-скла. Механічні характеристики матриці та волокна наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Механічні характеристики та геометричні розміри компонентів скловолоконного КМ

Матеріал	Модуль Юнга, $E$ (МПа)	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$	Густина, $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	Розміри, (м)
Епоксидна смола (матриця)	$3,45 \cdot 10^3$	0,35	1380	$10^{-3} \times 10^{-3} \times 10^{-3}$ (куб)

Е-скло (армуюче волокно)	$7,34 \cdot 10^4$	0,21	2540	діаметр $d = 2 \cdot 10^{-4}$
-----------------------------	-------------------	------	------	----------------------------------

Розрахунок механічних напружень у навантаженому зразку кубічної форми із двома армуючими волокнами проводили методом скінченних елементів. Нижня грань кубічної матриці вважалась жорстко защемленою, а протилежну їй грань навантажували рівномірно розподіленим по її поверхні нормальним зусиллям розтягу інтенсивності 1 МПа. Вважали, що волокна жорстко зчеплені із матрицею та розміщені на достатній відстані від паралельних їм граней зразка, щоб знехтувати впливом цих країв на розподіл механічних полів у композиті. Розглянуто такі три випадки орієнтації волокон: паралельні одне одному; розміщені під кутом  $45^\circ$  та  $90^\circ$  одне до одного.

Область композиту розбивали стандартними чотиригранними скінченними елементами по 10 вузлів на кожному. Розрахунок проводили для різної густини розбиття, поетапно згущуючи сітку скінченних елементів доти, доки різниця між попереднім та наступним розрахунком не стане незначною. Тоді точність отриманого числового результату буде максимальною. У даному випадку середня сумарна кількість скінченних тетраелементів становила близько 46000, а кількість вузлів – 75000.

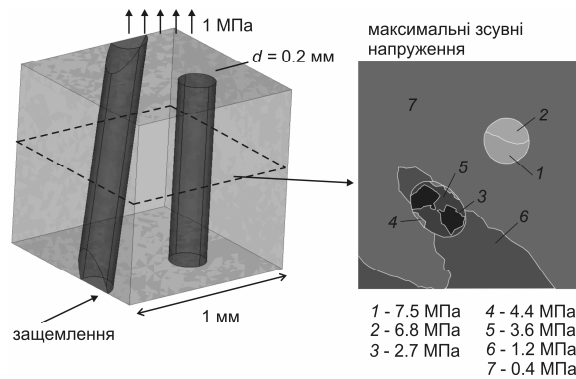
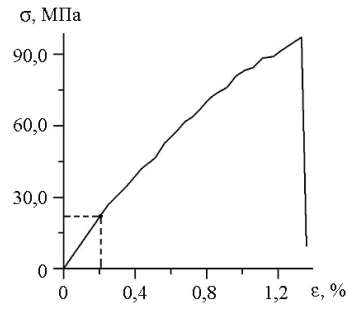


Рисунок. 1. Розподіл максимальних зсувних напружень у точках серединного перерізу зразка склопластику (площина окреслена пунктирною лінією) для випадку взаємної орієнтації волокон під кутом  $45^\circ$

На рис. 1 зображено результати розрахунків напружень зсуву на площадках їхніх максимальних значень у серединному перерізі зразка композиту. За результатами розрахунків можна стверджувати, що найбільші значення максимальних зсувних напружень виникають у зонах біля границь контакту матриці з армуючими компонентами в усіх трьох випадках їхнього взаємного розміщення.

Отже, вважаючи прилеглі зони до границі контакту між наповнювачем та армуючим елементом структурно найслабшим місцем композиційного матеріалу, на основі отриманих розрахунків, можна очікувати, що саме ці зони будуть найімовірнішими місцями зародження та розвитку руйнування внаслідок відшарування арматури від матриці. Очевидно, що використання для виробництва композитів волокон та матриці з ближчими значеннями модулів пружності може сприяти зменшенню значень механічних напружень у зонах контакту цих компонентів.

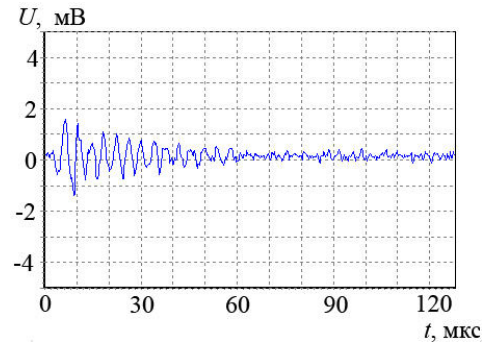
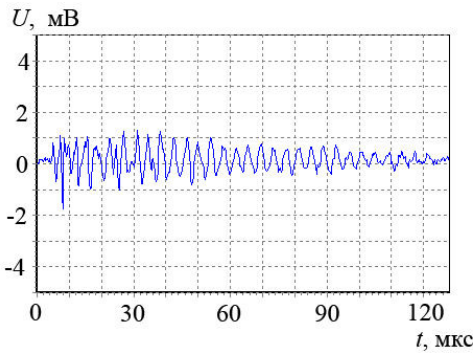
**Результати експериментів та їх тлумачення.** На рис. 2 зображено типову діаграму розтягу, записану за вказаною методикою, а на рис. 3 – характерні сигнали АЕ в різних її точках.



*a*

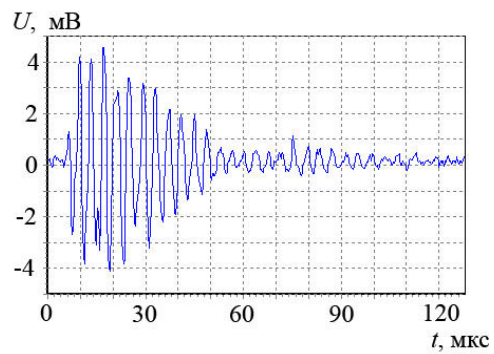
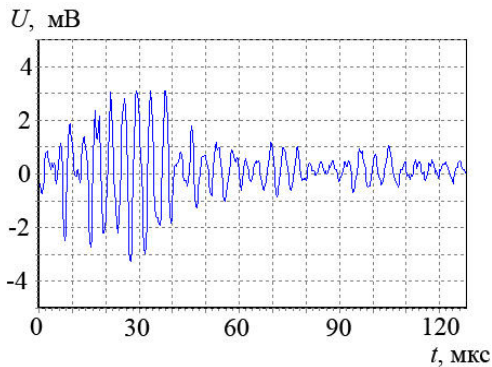
*б*

Рисунок 2. Діаграма розтягу зразка прямокутного перерізу зі скловолоконного композиту, армованого склотканиною (*a*), та його вигляд після зруйнування (*б*); точкою на діаграмі позначено початок макроруйнування.



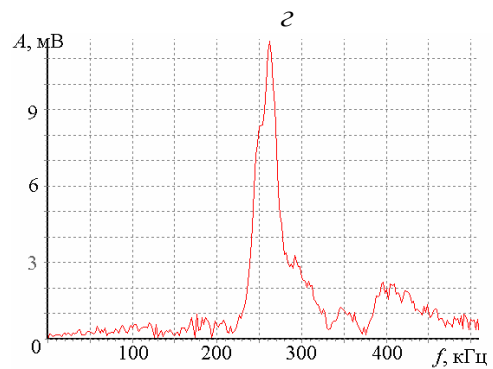
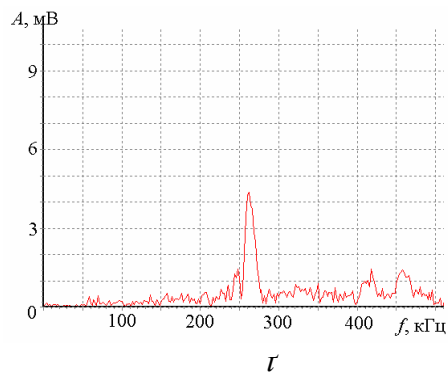
*a*

*б*



*в*

*г*



*а*

*б*

Рисунок 3. Характерні для різних стадій навантаження скловолоконного композиту сигнали АЕ (*a-г*) та їх спектральні характеристики (*а-б*): *a* – за напруження  $\sigma = 12,5$  МПа; *б* –  $\sigma = 18,4$  МПа; *в* –  $\sigma = 37,8$  МПа; *г* –  $\sigma = 50,6$  МПа; *а* – спектр сигналу, зображеного на рис. 4.11; *б* – спектр сигналу, зображеного на рис. 4.11, *г*

Проаналізуємо коротко за САЕ характер руйнування скловолоконного композиту. У ньому виникають сигнали АЕ вже на ранніх стадіях навантаження (рис. 3). Вони змінюються з його зростанням за амплітудно-частотними ознаками, що свідчить про

зміну механізмів розвитку руйнування. На початкових його стадіях переважають низькоамплітудні САЕ з широким частотним спектром. Далі вони незначно наростають, зберігаючи при цьому спектр широким. Що вище навантаження, то більше домінують вищі амплітуди САЕ, які починають звужувати спектр частот з одночасним зменшенням часу наростання переднього фронту сигналів. Це характерно для частішого утворення мікротріщин, одночасного руйнування кількох волокон або утворення макротріщин більшої еквівалентної площі у матриці. Так відбувається аж до утворення шийки, яка характеризується світлішою областю на зразку та незначним звуженням останнього. Далі починається інтенсивне руйнування зі суттєвим зростанням кількості сигналів АЕ. На цій стадії деформування гіпотетично інтенсивно зароджуються та розвиваються мікро- і макротріщини, порушується когезія волокон. Ці процеси є джерелами АЕ [2]. Такі механізми вступають у дію за деформації  $\epsilon > 0,8 \dots 1,0\%$ .

Сигнали АЕ малих амплітуд та порівняно тривалого часу наростання переднього фронту імпульсу домінують за навантажень, що нижчі від точки початку докритичного розтріскування. За наближення до неї сигнали АЕ дещо наростають і починають все частіше проявлятися такі, в яких наявні ознаки крихкого руйнування, – на порядки нижчі часу наростання переднього фронту сигналів з різними, переважно наростаючими амплітудами, а у спектрах сигналів є тенденція до звуження. Сигнали притаманні крихкому руйнуванню вже домінують при переході через точку докритичного розтріскування – починається макроруйнування матеріалу. Сказане вище підтверджують результати, що на рис. 4.

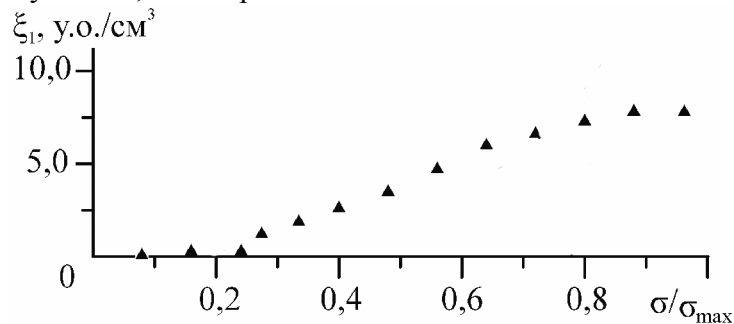


Рисунок 4. Залежність акустико-емісійної міри пошкодженості композиту від прикладеного квазістатичного навантаження

Таким чином, під час оцінювання докритичної пошкодженості композитів, армованих скловолоннами різної напрямленості, необхідно враховувати такі основні ознаки, що визначаються за параметрами САЕ: їх амплітуду; швидкість наростання переднього фронту події АЕ; ширину спектру та показник акустико-емісійної міри об'ємної пошкодженості матеріалу.

**Висновки.** Як засвідчують результати розрахунків скловолонних композитів числовими методами, розподіл напружень у них залежить від просторової орієнтації волокон.

З аналізу сигналів АЕ, записаних під час випробувань зразків скловолонних композитів розтягом, випливає, що їх руйнування розпочинається уже на ранніх стадіях навантаження і триває протягом подальшого його підвищення.

Особлива активність АЕ настає за наближення до моменту утворення докритичного розтріскування, де до його початку домінують сигнали АЕ, характерні для в'язкого руйнування, а після цього – для крихкого, з малим часом наростання переднього фронту сигналу, вузьким спектром частот тощо.

Механізми руйнування скловолоконних композитів протягом навантаження зразків на всьому часовому проміжку аж до цілковитого їх зруйнування різні й чергуються між собою. Їх можна ефективно розрізнити за багатокритеріальним аналізом сигналів АЕ: швидкістю наростання переднього фронту; шириною спектра; амплітудним розподілом; домінуючою у спектрі частотою, поєднуючи їх зі значенням навантаження.

#### **Література**

1. Назарчук, З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник. У 3 т. [Текст] / З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський. – К: Наукова думка, 2009. – 877 с.
2. Сокальський, В.Р. Оцінка об'ємної пошкоженості матеріалів методом акустичної емісії [Текст] / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
3. Robinson E.L. Effect of temperature variation on the long time rupture strength of steels /E.L. Robinson. //Trans. ASME. – 1952. – **74**,№5. – P.68 – 76.
4. Ильюшин, А.А. Об одной теории длительной прочности [Текст] / А.А. Ильюшин // Мех. твердого тела. – 1967. – №3. – С.21 – 35.
5. Тамуж, В.П. Вариант построения феноменологической теории разрушения [Текст] / В.П. Тамуж, А.Ж. Лагздиньш // Механика полимеров. – 1968. – №4. – С.638 – 641.
6. Патент України №2914. МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів [Текст] / О.Є. Андрейків, В.Р. Скальський, М.В. Лисак. – Опубл. 26.12.94 р. Бюл. 5–1.