

УДК 539.3; 620.179.17

В.Р.Скальський¹, Ю.Я.Матвіїв², Т.А.Крадїнова²¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України²Луцький національний технічний університет

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА НАКОПИЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ КОМПОЗИТІВ

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

Актуальність проблеми. Композитні матеріали (КМ) 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; хорошими 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, у житловому та промисловому будівництві, військовій промисловості тощо [1].

Вибір орієнтації волокон та комбінування їх різних типів у взаємозв'язку із підбором матеріалу матриці дає змогу поліпшувати міцнісні та пружні властивості КМ. Необхідно зазначити, що найпоширенішими серед них є скловолокна, оскільки їх собівартість найнижча. Це і зумовило найширше застосування скловолоконних КМ у зазначених вище сферах господарювання. Однак щодо їх міцнісних характеристик, то необхідно підкреслити, що вони суттєво різні для різних типів армуючої компоненти та матриці [2]. Тому актуальність проблеми дослідження міцнісних властивостей та тріщиностійкості нових КМ завжди є актуальними.

У світовій практиці у сферах застосування скловолоконних композитних матеріалів на сьогодні не існує загальноприйнятих методів визначення характеристик їх статичної тріщиностійкості. Пов'язано це із 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 [3]. 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 [4].

Як показує світова практика, визначення стадій розтріскування композитів, а особливо динаміки його розвитку, знаходиться на етапі становлення. Ось чому проведені у даній праці дослідження спрямовані на розв'язання актуальної для низки галузей промисловості України науково-технічної задачі – створення ефективних прикладних методик кількісного оцінювання параметрів докритичного розтріскування скловолоконних композитних матеріалів за довільної орієнтації укладання у них армуючих волокон.

Перспективним напрямком неруйнівного контролю і технічної діагностики для визначення об'ємної пошкодженості композитів є метод акустичної емісії (АЕ) [4]. 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 з 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 ψ ($1 \geq \psi \geq 0$) – „суцільність” [5]. У початковому стані за відсутності пошкодженості $\psi = 1$, а в часі функція ψ спадає і введено функцію $\omega \geq 0$ ($\omega = 1 - \psi$), яку названо пошкодженістю. Надають функції ψ статистичний зміст і тоді зміну суцільності описують кінетичним рівнянням виду:

©В.Р.Скальський, Ю.Я.Матвіїв, Т.А.Крадїнова

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

де F залежить від ψ 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 [6].

Відомі також інші схеми побудови континуальних моделей накопичення пошкоджень. Теорія довготривалої міцності вводить поняття пошкодження Π (його компоненти $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$), що характеризує накопичення дефектів і залежить від історії навантаження даного елемента середовища [7]. Передбачають невід'ємні міри пошкоджень

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

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

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

(3)

де c_k – константи матеріалу. У спрощеному варіанті пошкодження Π є симетричним тензором другого рангу.

У праці [8] пошкоженість 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 мікро дефектів моделюється ростом 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 із співвідношень термодинаміки необоротних процесів, автори виводять кінетичне рівняння для функції концентрації. Така схема дозволяє розглядати руйнування за повзучості, малоциклової втому, вплив складного навантаження тощо.

Так, наприклад, у для опису 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 кількісної оцінки пошкоженості 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 оцінки об'ємної пошкоджуваності матеріалу. У залежності від вибраного параметра, якому ставиться у відповідність міра пошкоженості і спосіб її інтерпретування, отримують різні її значення.

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

Результати досліджень та їх інтерпретування. В основі експериментальних досліджень лежить модель кількісної оцінки об'ємної пошкоженості матеріалу, яка враховує лінійність накопичення пошкоджень у твердому тілі [5]. Основні її положення такі:

1. Механічна міра об'ємної пошкоженості матеріалу ξ 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 ξ лінійно пропорційна справжній деформації e полікристалічних тіл.

3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкоженості матеріалу ξ_1 визначається відношенням суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, де відбувається дефектоутворення.

4. Ця міра об'ємної пошкодженості матеріалу ξ_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 склоканини, яку покривали шаром смоли із затверджувачем, тоді знову наносили склотканину із смолою та затверджувачем. Так набирали необхідну товщину склопластика. В нашому випадку вона становила 4 мм. Спочатку випробовували плоскі зразки із згаданого вище скло волоконного композиту, а потім з інших матеріалів їх розтягали на розривній машині СВР-5 [4] зі швидкістю переміщення рухомого затиску 4×10^{-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 [4]. Крім того, для уникнення впливу завад, які проходять мережею живлення, застосовували метод паралельного (індикаторного) каналу [9]. 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. Аналогові сигнали від перетворювачів сили і видовження зразка надходили на відповідні низькочастотні канали системи, де вони оцифровувалися, оброблялися і зберігалися на жорсткому диску 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 у всіх 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 склопластика 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.

Таким чином, один із найважливіших етапів прогнозування міцності композитів – це визначення напружено-деформованого стану в зонах найбільшої імовірності зародження та розвитку руйнування. У даній праці 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 наведені в таблиці.

Таблиця.

Механічні характеристики та геометричні розміри компонентів скловолоконного КМ.

Матеріал	Модуль Юнга, E (МПа)	Коефіцієнт Пуасона, ν	Густина, ρ (кг/м ³)	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. Прийняли, що волокна жорстко зчеплені із матрицею та розміщені на достатній віддалі 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° та 90° одне до одного.

Область композиту розбивали стандартними чотиригранними скінченними елементами по 10 вузлів у кожному. Розрахунок проводили для різної густоти 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 тетра-елементів становила близько 46000, а кількість вузлів – 75000.

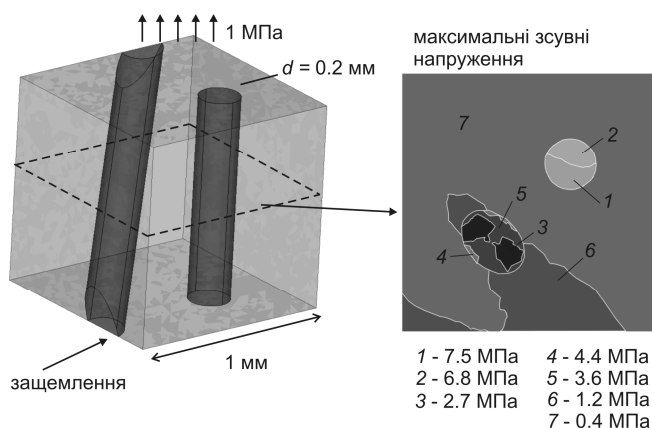


Рис. 1. Розподіл максимальних зсувних напружень у точках серединного перерізу зразка склопластика (площина окреслена пунктирною лінією) для випадку взаємної орієнтації волокон під кутом 45° .

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 в зонах біля границь контакту матриці із армуючими компонентами у всіх 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 із близькими значеннями модулів пружності може сприяти зменшенню значень механічних напружень у зонах контакту цих компонентів.

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

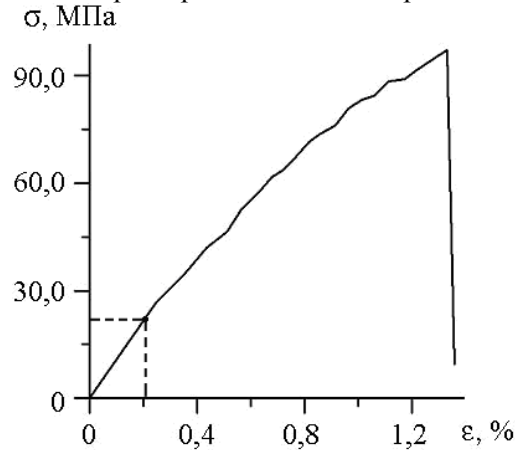


Рис. 2. Діаграма розтягу зразка прямокутного перерізу зі скловолоконного композита, армованого склотканиною (точкою на діаграмі позначено початок макроруйнування).

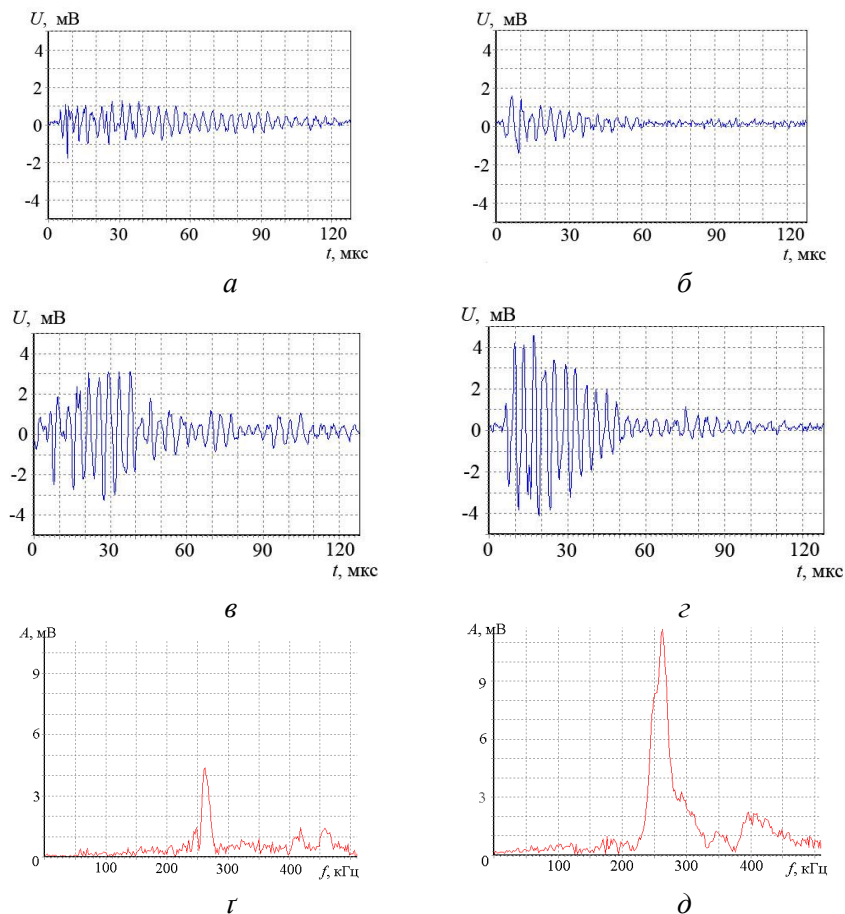


Рис. 3. Характерні для різних стадій навантаження скловолоконного композиту сигнали АЕ (а-д) та їх спектральні характеристики (e-д): а – за напруження $\sigma = 12,5$ МПа; б – $\sigma =$

18,4 МПа; $\nu - \sigma = 37,8$ МПа; $\varepsilon - \sigma = 50,6$ МПа; τ – спектр сигналу, зображеного на рис. 3,а; δ – спектр сигналу, зображеного на рис. 3,з.

Як бачимо, у КМ виникають сигнали АЕ вже на ранніх стадіях навантаження (рис. 3). Вони змінюються із його зростанням за амплітудно-частотними ознаками, що свідчить про зміну механізмів розвитку руйнування. На початкових його стадіях переважають низько амплітудні 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 із 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 [5]. Такі механізми вступають у дію за деформації $\varepsilon > 0,8 \dots 1,0$ %.

Сигнали АЕ малих амплітуд та порівняно тривалого часу наростання переднього фронту імпульса 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 часи 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, показані на рис. 4.

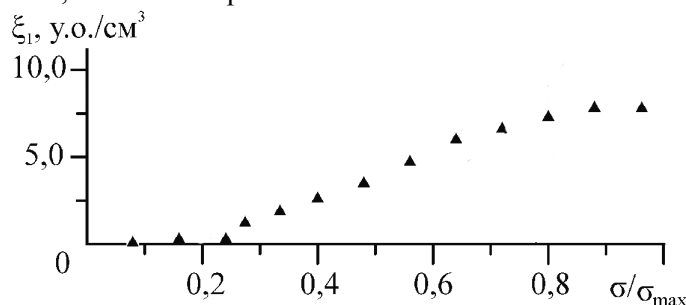


Рис. 4. Залежність акустико-емісійної міри пошкодженості композиту від прикладеного квазістатичного навантаження.

Таким чином, під час оцінки докритичної пошкодженості композитів, армованих скловолокнами 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. У армованих композитах розподіл напружень залежить від просторової орієнтації армуючої компоненти.

Руйнування композитних матеріалів розпочинається на ранніх стадіях їх навантаження і триває протягом подальшого його наростання.

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

Механізми руйнування скловолоконних композитів протягом їх навантаження аж до цілковитого руйнування 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.

1. Справочник по композиционным материалам: Кн. 1 / [под ред. Дж. Любина, Б.Э. Геллера; пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта]. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
2. Божидарнік В.В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів. В 2 т. / В.В. Божидарнік, О.Є. Андрейків, Г.Т. Сулим – Луцьк: Надстир'я, 2007. – 824 с.
3. Кортен Х. Т. Механика разрушения композитов // Разрушение / Х. Т. Кортен; под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1976. – Т.5. – С. 367–471.
4. Назарчук З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Науково-технічний посібник. У 3 т. /З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський. – К: Наук. думка, 2009. – 877 с.
5. Скальський В.Р. Оцінка об'ємної пошкоженості матеріалів методом акустичної емісії. /В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
6. 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.
7. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности / А.А. Ильюшин. // Мех. твердого тела. – 1967. – №3. – С.21 – 35.
8. Тамуж В.П. Вариант построения феноменологической теории разрушения /В.П. Тамуж, А.Ж. Лагздиньш. // Механика полимеров. – 1968. – №4. – С.638 – 641.
9. Патент України №2914. МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / О.Є. Андрейків, В.Р. Скальський, М.В. Лисак. – Опубл. 26.12.94 р. Бюл. 5-1.

