

ВИЗНАЧЕННЯ ЗА СИГНАЛАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ МЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ СКЛОВОЛОКОННИХ КОМПОЗИТІВ

Скальський В.Р.

Рудавський Д.В.

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

Матвій Ю.Я.

Луцький національний технічний університет

Актуальність проблеми

Сьогодні дослідження багатьох провідних науково-дослідних інституцій світу спрямовані на дослідження розвитку руйнування композитів [1-3]. Причиною цього є широке їх застосування у сучасній інженерній практиці. Сюди слід віднести нові композитні матеріали на основі пластиків, армованих високоміцними та високомодульними волокнами з низькою питомою вагою (наприклад – скловолокно, бор, вуглець), залізобетонні конструкції тощо.

Волоконні композити відрізняються від однорідних конструкційних матеріалів тим, що вони складаються з двох або більше різних за формою фаз. Це фаза високої міцності у вигляді тонких волокон, яка, як правило, є крихкою, і фаза-матриця низької міцності, яка зазвичай є пластичнішою та займає простір між волокнами і повністю пов'язана з ними. Волокна можуть бути орієнтовані довільним чином або спеціально вкладені у вибраному напрямку. Матеріал матриці здебільшого ізотропний та однорідний.

Однією із найвагоміших переваг використання композитних матеріалів у сучасному будівництві, в тому числі і в дорожньому будівництві є їх низька питома вага. До прикладу, скло й вуглець легші за алюміній, питома вага бору приблизно дорівнює питомій вазі алюмінію. Таким чином, за рівної абсолютної міцності міцність композитів, віднесена до питомої ваги, успішно конкурує з цією характеристикою для алюмінієвих сплавів.

Можливість вибирати орієнтацію волокон і комбінувати різні типи волокон та матриці дозволяє створювати нові матеріали з кращими міцнісними і пружними властивостями. З тієї ж причини можна очікувати й існування низки нових характеристик руйнування.

Стан проблеми

Велика кількість різних дефектів волокон впливає на механізм руйнування. Борні волокна, наприклад, схильні до радіального розтріскування. Кожне волокно неминуче містить дефекти різних розмірів в деяких точках вздовж його осі. Можливо, що у всіх композитах волокна мають внутрішні залишкові напруження, які виникли під час з'єднання волокон і матриці в одне ціле. Оцінка внесків цих недосконалостей в руйнування повинна здійснюватися послідовно або за допомогою деякої моделі руйнування, що враховує їх спільний внесок.

Модулі Юнга й зсуву волокон у великій мірі визначають успішне застосування їх у композитах. Після першого вдалого використання волокон Е-скла основна увага була спрямована 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:

- 1) підвищення твердості означає, що задане напруження виникає у волокні за меншої деформації, так що тут порушується підібране для склопластика співвідношення між граничними міцністю та деформацією волокон і матриці;
- 2) передача навантаження через прошарок матриці між волокнами шляхом зсуву в матриці викликає зсувні напруження в матриці та на границі розділу волокно–матриця, що залежать від модуля пружності.

Однією з найдискусійніших областей механіки руйнування композитів є дослідження ролі поверхневої обробки волокон, що може проводитись як до, так і під час одержання композиту, а також вивчення поверхні розділу між волокном і матрицею. Представники існуючих у цій області наукових напрямків (до якого належать в основному хіміки й фахівці з кераміки, що займаються проблемами адгезії) дотримуються думки про наявність у композитах трьох фаз: волокон, матриці та адгезійного шару, що являє собою твердий розчин або щось подібне йому. Цей проміжний шар відрізняється від властивостей двох інших фаз (звичайно, його властивості нижчі). Деякі дослідники вважають, що будь-яке руйнування починається саме в третій фазі.

Таким чином, один із найважливіших етапів прогнозування міцності композитів – це визначення напружено-деформованого стану в зонах найбільшої ймовірності зародження та розвитку руйнування. В даній роботі зроблено спробу на основі методу скінченних елементів визначити напружений стан в 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.

Таблиця – Механічні характеристики та геометричні розміри компонентів композитів [3]

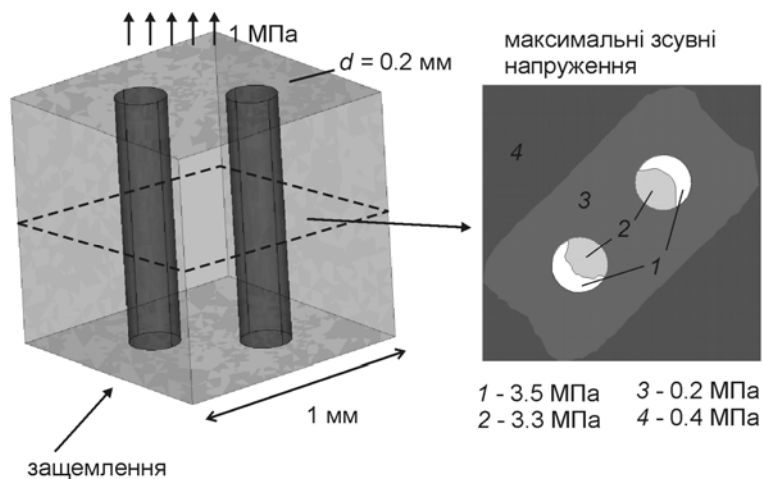
| Матеріал | Модуль Юнга, E (МПа) | Коефіцієнт Пуасона, ν | Густина, ρ (кг/м ³) | Розміри, (м) |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|
| Епоксидна смола (матриця) | $3.45 \cdot 10^3$ | 0.35 | 1380 | $10^{-3} \times 10^{-3} \times 10^{-3}$ (куб) |
| Е-скло (армувальне 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 армувальними волокнами проводили методом скінченних елементів [4]. Нижня грань кубічної матриці вважалась жорстко затиснутою, а протилежну їй грань навантажували рівномірно розподіленим по її поверхні нормальним зусиллям розтягу інтенсивності 1 МПа (рис. 1). Вважали, 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 відносно другого (рис. 1).

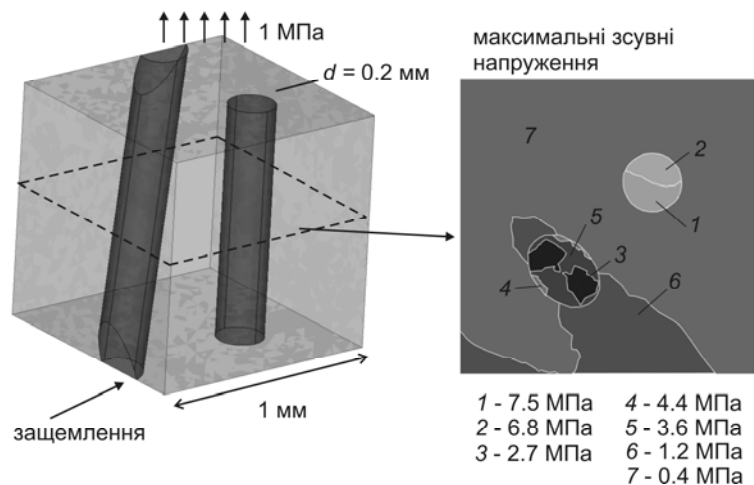
Область композиту розбивали стандартними чотиригранними скінченними елементами по 10 вузлів на кожному [4]. Розрахунок проводили для різної густоти розбиття, поетапно

згущуючи сітку скінченних елементів до тих пір, поки різниця між попереднім та наступним розрахунком не стане незначною. Тоді точність отриманого числового результату буде максимальною. В даному випадку середня сумарна кількість скінченних тетра-елементів становила близько 46000, а кількість вузлів – 75000.

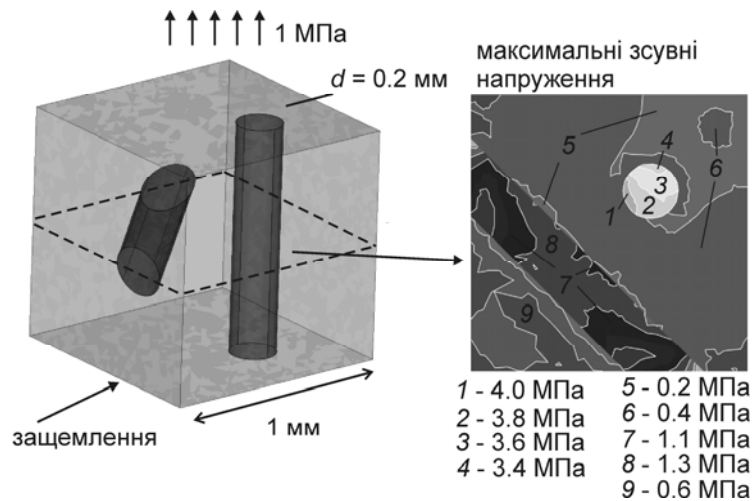
На рис. 1 зображено результати розрахунків напружень зсуву на площадках їх максимальних значень в серединному перерізі зразка композиту відповідно до різних типів орієнтації волокон в склопластику.



a)



б)



в)

а) під кутом 0° ; б) – 45° ; в) – 90°

Рис. 1. Розподіл максимальних зсувних напружень в точках серединного перерізу зразка склопластика (площина окреслена штриховою лінією) для випадків взаємної орієнтації волокон

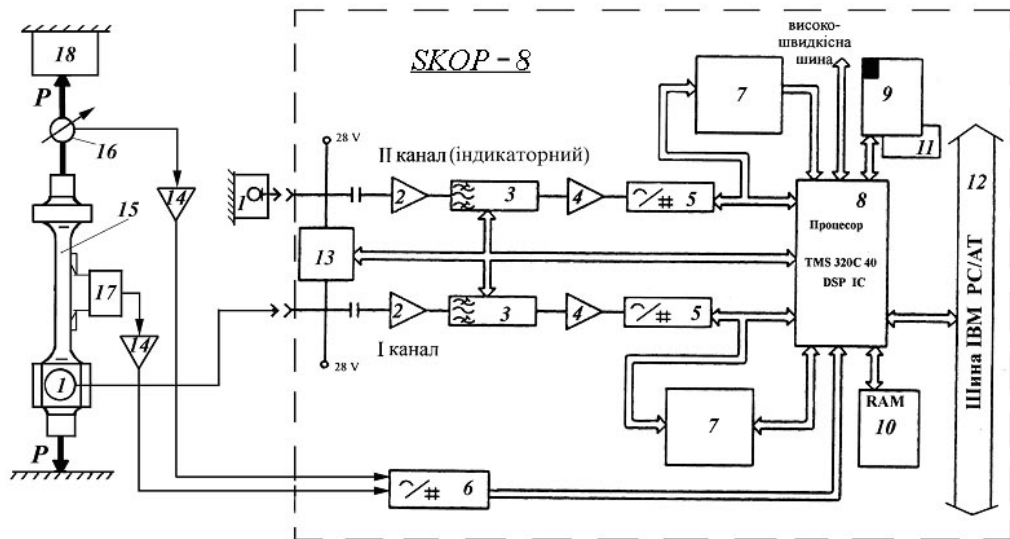
Як впливає з рис. 1, найбільші значення максимальних зсувних напружень спостерігаються в зонах біля границь контакту матриці із армувальними компонентами у всіх трьох випадках їх взаємного розташування.

Отже, вважаючи прилеглі зони до границі контакту між наповнювачем та армувальним 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 ближчими значеннями модулів пружності може сприяти зменшенню значень механічних напружень у зонах контакту цих компонентів.

Результати досліджень

В експериментах використовували зразки зі скловолоконного композиту, сформованого так. У форму наносили спочатку декоративний шар гелькоуту. До нього додавали шар склотканини, яку покривали шаром смоли із затверджувачем, після чого знову наносили склотканину із смолою та затверджувачем. Так набирали необхідну товщину склопластика. В нашому випадку вона становила 4 мм.

Плоскі зразки із такого скловолоконного композиту розтягали на розривній машині типу СВР-5 [5] зі швидкістю переміщення рухомого захопу 4×10^{-7} м/с. Щоб виключити вплив генерування сигналів АЕ (САЕ) від захопів машини на результати досліджень, зразки попередньо навантажували зашунтованими у спеціальній оправці, використовуючи ЕК [6]. Крім того, для уникнення впливу завад, які проходять мережею живлення, застосовували метод паралельного (індикаторного) каналу [7]. Після зняття оправки, на розміщеному в захопах машини зразку встановлювали первинний перетворювач АЕ (ПАЕ), із якого електричні сигнали подавали на попередній підсилювач системи відбору та обробки САЕ типу SKOP-8 (розробка ФМІ НАН України). 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 (рис. 2).



1 – ПАЕ; 2 – попередній підсилювач САЕ; 3 – блок фільтрів верхніх і нижніх частот; 4 – підсилювач потужності; 5,6 – аналогово-цифровий перетворювач; 7 – блок відтворення зображень у реальному масштабі часу; 8 – блок процесора; 9 – блок оперативної пам'яті; 10 – пам'ять на жорсткому диску; 11 – допоміжний запам'ятовуючий пристрій; 12 – шини персонального комп'ютера; 13 – блок тестування пам'яті; 14 – підсилювач постійного струму; 15 – досліджуваний зразок; 16 – тензометричний динамометр; 17 – тензометричний перетворювач переміщень; 18 – навантажувальна установка

Рис. 2. Структурна схема експериментальних досліджень

Так отримували синхронний запис САЕ і характеристик навантаження зразків, за якими оперативно можна було слідкувати на екрані монітора в реальному часі. Для всіх зразків місце встановлення ПАЕ, режими відбору, підсилення та обробки 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.

На рис. 3 показано типову діаграму розтягу, записану за вказаною методикою, а на рис. 4 – характерні САЕ в різних її точках.

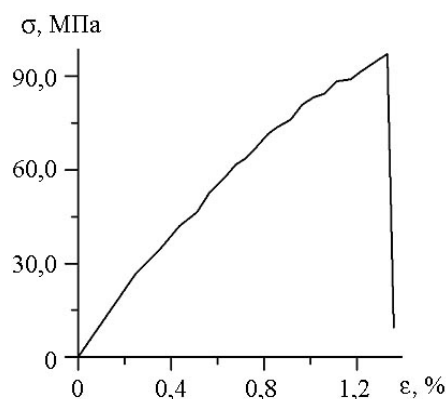
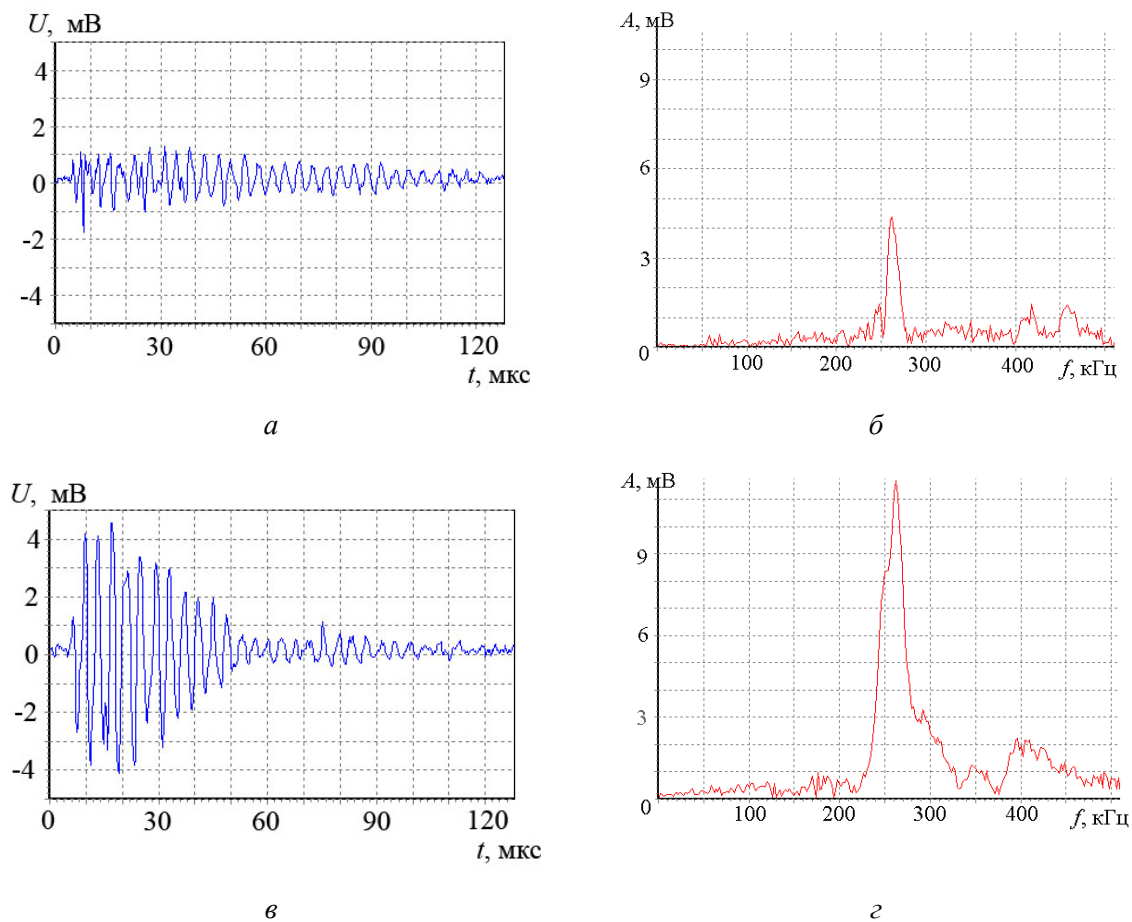


Рис. 3. Діаграма розтягу зразка прямокутного перерізу зі скловолоконного композита, армованого склотканиною



а, б – за напруження $\sigma = 12,5$ МПа; в, г – $\sigma = 50,6$ МПа

Рис. 4. Характерні для різних стадій навантаження хвильові відображення сигналів АЕ (а, в) та їх спектри (б, г)

Проаналізуємо коротко за показами САЕ характер руйнування композиту. У ньому виникають сигнали АЕ вже на ранніх стадіях навантаження (рис. 4). Вони змінюються з його ростом за амплітудно-частотними ознаками, що свідчить про зміну механізмів розвитку руйнування. Що вище навантаження, то домінують більші амплітуди САЕ. Це, мабуть, характерно для одночасного руйнування кількох волокон або для утворення макротріщин більшої еквівалентної площі у матриці. Так відбувається аж до утворення шийки, яка характеризується світлішою областю на зразку та незначним звуженням останнього. Далі розпочинається інтенсивне руйнування зі суттєвим зростанням кількості сигналів. На цій стадії деформування гіпотетично інтенсивно зароджуються та розвиваються мікро- і макротріщини, порушується когезія волокон, які є джерелами АЕ [5]. Такі механізми вступають у дію за величин $\varepsilon > 0,8 \dots 1,0$ %.

Висновки

Аналіз сигналів АЕ показав, що руйнування скловолоконних композитів проходить від початку його навантаження. Особливо інтенсивно воно відбувається за наближення до моменту утворення шийки. Механізми руйнування, визначені за спектральним аналізом сигналів АЕ, різні і чергуються між собою практично протягом циклу навантаження.

Література

1. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
2. Вильдеман Б.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. / Под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
3. Розен В.У., Дау Н.Ф. Механика разрушения волокнистых композитов // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1976. – Т. 7, ч. I. – С. 300–367.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 543 с.
5. Skalskyi V.R., Koval P.M. Some methodological aspects of application of acoustic emission. – Lviv: Publishing House Spolom, 2007. – 336 p.
6. Скальський В.Р., Андрейків О.Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
7. Патент України №2914. МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Лисак М.В. Опубл. 26.12.94 р. Бюл. 5-1.