

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕННЯ І РУЙНУВАННЯ ПАНЕЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ УДАРІ

В. В. Астанін, Г. О. Щегель

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Abstract. The research is devoted to modeling damage and fracture of panel structural elements made of laminated fiber-reinforced composite material. Modeling is based on proposed and elaborated probabilistic approach to analysis of damage parameters, which is realized within the damage mechanics procedures. Results of FEM-calculations are tested in comparison with experimental data.

Постановка задачі. Ідеологія побудови зміцненого умовно нескінченними армуючими волокнами композиційного матеріалу передбачає найбільш безпосередню реалізацію у вигляді ламінованих багатошарових пластин і оболонок. В інженерній практиці важливе значення має сприйняття виготовленими із такого виду композитів панельними конструктивними елементами бокового, тобто із ненульовою нормальною до поверхні панелі складовою швидкості руху, ударного навантаження. Такого виду задачі виникають у авіаційній промисловості, наземному транспорті. Визначенню підлягають характеристики енергопоглинання матеріалу конструктивного елемента. Проте сприйняття матеріалом енергії і витікаючі з цього властивості захисту від удару, несучої здатності і живучості конструкції визначаються особливостями формування пошкоджень і їх розподілом у об'ємі матеріалу, а також співвідношенням пошкодженого і зруйнованого, тобто уже без залишкової міцності, матеріалу. Це визначає важливість розв'язання проблеми адекватного моделювання пошкодження і руйнування композитів при ударному навантаженні.

Фізична модель матеріалу. Проблемою, з якою зіштовхується моделювання поведінки композиційних матеріалів під навантаженням, є, у зв'язку з їх багатокомпонентністю і багатогранністю діючих механізмів пошкодження, складність об'єднання та врахування всіх прийнятих до уваги факторів, що впливають на процес деформування і руйнування, до єдиних рівнянь, представлених в рамках моделі матеріалу як математично детермінованої залежності напружень від деформацій $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$. Напруження як силова характеристика, що є мірою, за допомогою якої математично описуються базові для макросвіту впливи електромагнітної та гравітаційної взаємодій, однозначно пов'язується в моделі з деформацією як просторовою мірою зміни взаємного розташування точок матеріалу. В даному дослідженні здійснена спроба моделювання поведінки композиційного матеріалу на основі запропонованого авторами ймовірного підходу до розрахунку параметрів пошкодження, що реалізовано в рамках механіки пошкодження [1] і перевірено у порівнянні з експериментальними даними розрахунками методом скінчених елементів.

Відповідно до класичної теорії шаруватих оболонок залежність зусиль N і моментів M в площині ламінату від відносних деформацій ε^0 в серединній площині і других похідних κ від прогину серединної площини по координатним напрямкам, які позначимо як $i=1, j=2$ і які лежать одночасно в площині ортотропного ламінату та у відповідних площинах симетрії, виражається таким чином [2]:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де, якщо позначити як Q_{ij}^l матрицю жорсткості, яка відповідає l -му шару, зовнішня поверхня якого відстоїть від серединної поверхні ламінату на відстані z_l , а m – загальна кількість таких шарів:

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^m Q_{ij}^l \cdot (z_l - z_{l-1}); \quad B_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^m Q_{ij}^l \cdot (z_l^2 - z_{l-1}^2);$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{l=1}^m Q_{ij}^l \cdot (z_l^3 - z_{l-1}^3).$$
(2)

Рівняння напружено-деформованого стану матеріалу шарів, що піддаються пошкодженню внутрішньої структури внаслідок дії прикладеного навантаження, але непошкоджені ділянки якого продовжують чинити цьому навантаженню пружний опір, має вигляд залежності напруження σ від деформацій ε (прийняті позначення індексів за Фойгтом [4])

$$\sigma_i = f[\tilde{Q}_{ij}(d_{ij}), \varepsilon_j], \quad i, j = 1, 2, 6. \quad (3)$$

де \tilde{Q}_{ij} – тензор пошкодженої жорсткості, який розраховується залежно від величини параметрів пошкодження d_{ij} [5].

У відповідності до запропонованої моделі параметри пошкодження d_{ij} знаходять як конкретну реалізацію випадкової величини, заданої функцією ймовірності пошкодження матеріалу, яку позначимо як P_d і представимо у вигляді:

$$P_d(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \left(1 - \frac{1}{2\pi \cdot L} \cdot e^{-\left(\frac{(\varepsilon - d\mu_\varepsilon)^2}{2 \cdot (dS_\varepsilon)^2} + \frac{(\dot{\varepsilon} - d\mu_{\dot{\varepsilon}})^2}{2 \cdot (dS_{\dot{\varepsilon}})^2} + \frac{(T - d\mu_T)^2}{2 \cdot (dS_T)^2}\right)}\right)^2, \quad (4)$$

де $L = dS_\varepsilon \cdot dS_{\dot{\varepsilon}} \cdot dS_T$; $d\mu_i$ – зміщення максимуму функції ймовірності пошкодження щодо осі відносної деформації ε , швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$, температури T при значеннях індекса $i = \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T$ відповідно; dS_i – середньоквадратичне відхилення для зазначених аргументів, яке знаходять за характеристиками критичних станів матеріалу, що відповідають його повному руйнуванню.

Результати чисельних розрахунків. Принципова схема навантаження панельного конструктивного елемента КЕ із багат шарового ламінованого композиційного матеріалу нормально до його поверхні в лабораторному експерименті, що відтворювалася при моделюванні, приведена на рис. 1.

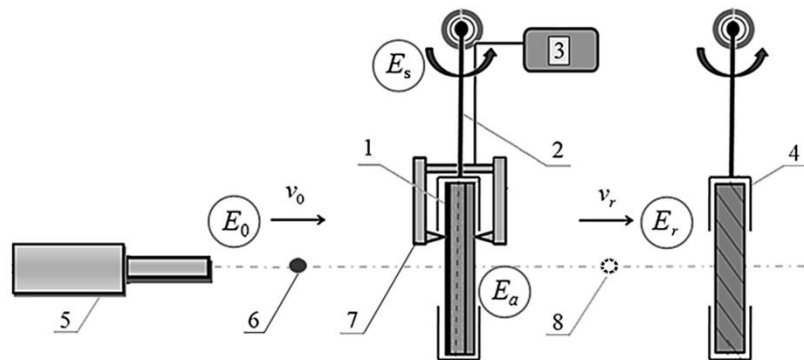


Рис. 1. Принципова схема ударного навантаження панельного КЕ:

- 1 – досліджуваній КЕ, що поглинає енергію удару E_a ; 2 – балістичний маятник для реєстрації переданої на опору КЕ енергії E_s ; 3 – блок реєстрації та аналізу параметрів електромагнітного та акустичного полів; 4 – маятник для реєстрації залишкової кінетичної енергії ударника E_r ; 5 – система розгону ударника; 6 – ударник з швидкістю v_0 і енергією E_0 ; 7 – система датчиків акустичної та електромагнітної емісії; 8 – ударник після пробивання КЕ з швидкістю v_r

Моделювання здійснювалося в рамках скінченноелементного програмного комплексу «Abaqus», особливості застосовуваних методик розрахунку описані в [6]. Алгоритм розрахунку поведінки матеріалу при навантаженні відповідно до запропонованої

імовірнісної моделі був реалізований у вигляді користувальницької підпрограми, автоматично імплементованої у загальний алгоритм розрахунку даним програмним комплексом, як описано в [7]. Розглядається діапазон швидкостей удару до 1500 м/с ударником малої маси, таким чином, що енергія удару лежить в діапазоні до 3 кДж. Досліджуються защемлені по колу прямокутні панельні елементи при ударі сферичного ударника. З метою мінімізувати вплив крайового защемлення, діаметр робочої зони КЕ становив 150 мм. В якості вихідних даних для розрахунку використовувалися механічні характеристики гібридово-волоконного матеріалу на основі скловолокна та поліпропіленової матриці, визначені і описані у [8], [9], [10].

Отримані за результатами чисельних розрахунків відповідно до запропонованої імовірнісної моделі ізополя питомої поглиненої матеріалом енергії удару та сумарного пошкодження матеріалу в напрямку волокон основи і утка при швидкості удару 140 м/с приведені на рис. 2, а, б. Як видно з рис. 2, областям підвищеного енергопоглинання відповідають зони максимального пошкодження матеріалу. В рамках моделювання вдалося врахувати вплив величин деформації і швидкості деформації на величину пошкодження із отриманням близьких до експериментальних даних, як показано нижче, величин енергопоглинання зразка панельного елемента.

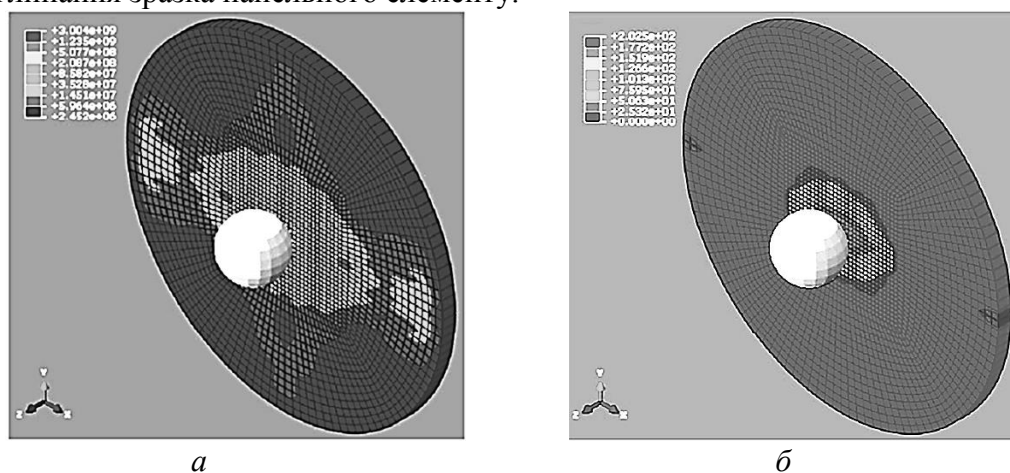


Рис. 2. Розрахункові ізополя питомої поглиненої матеріалом енергії удару (а) та параметрів пошкодження матеріалу в напрямку волокон основи і утка (б)

Порівняння результатів моделювання і експерименту. Основну увагу при проведенні дослідів та аналізі експериментальних даних було приділено загальній поглинутій панельним елементом енергії, що характеризує його як захисну перешкоду, а також характеристикам імпульсу (рис. 3, 4).

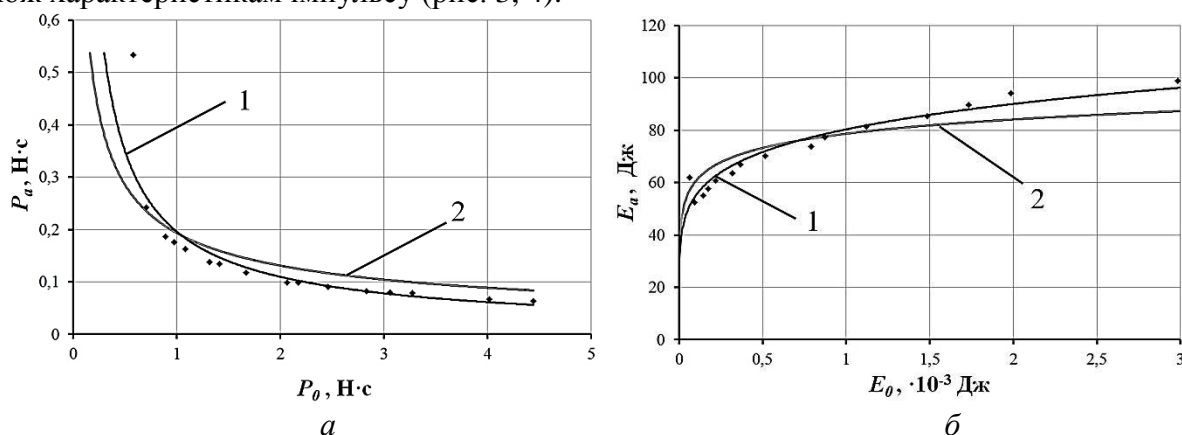


Рис. 3. Втрачений ударником при взаємодії із зразком імпульс в залежності від початкового імпульсу ударника (а) та поглинута панельним елементом енергія в залежності від початкової енергії удару (б)

В якості дослідницької установки використовувався експериментальний комплекс «aSTanin» («Acceleration System for Testing of Antidamage Innovations») для вивчення процесів ударної взаємодії в широкому діапазоні швидкостей, який дозволяє реєстрацію процесів перерозподілу енергії ударника і зразка матеріалу, а також реєстрацію акустичної та електромагнітної емісії, яка, як було встановлено в [5], супроводжує високошвидкісний удар складних композиційних матеріалів досліджуваного типу.

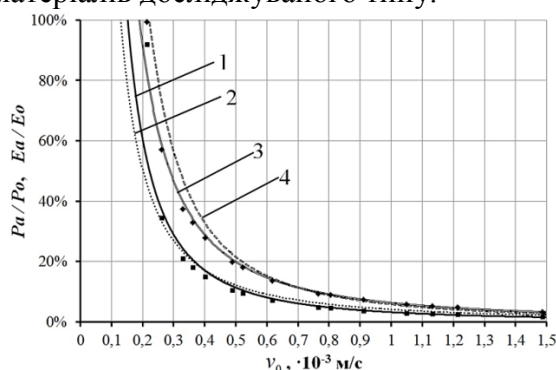


Рис. 4. Залежність питомого імпульсу (1, 2) та енергії (3, 4) ударної взаємодії за результатами експерименту (1, 3) та розрахунку (2, 4)

На рис. 3, а показана залежність різниці $P_a = P_0 - P_r$ імпульсу ударника до удару P_0 і після наскрізного пробивання P_r від початкового імпульсу ударника P_0 , на рис. 3, б – залежність поглиненої панельним елементом енергії E_a від початкової енергії удару E_0 за результатами розрахунку (1) та експерименту (2). Рис. 4 ілюструє залежність співвідношення відповідних величин від початкової швидкості удару v_0 . В рамках моделювання вдалося відобразити, як видно з графіків, не лише характер зміни властивостей енергопоглинання, а саме спадання питомої частини імпульсу та енергії ударника, яку бере на себе панельний елемент, виконуючи захисні функції, при зростанні швидкості удару (рис. 4), але і ту особливість ударної взаємодії, що хоча переданий на панельну ламіновану конструкцію імпульс при цьому зменшується (рис. 3, а), тим не менше абсолютні показники поглинутої енергії зростають (рис. 3, б), що дозволяє передбачити за результатами моделювання резерви несучої здатності конструкції.

Перелік посилань

1. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 80 с.
2. Рассказов А.О. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек / А.О. Рассказов, И.И. Соколовская, Н.А. Шульга. – К.: Вища школа, 1986. – 191 с.
3. Altenbach H. Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke / H. Altenbach, J. Altenbach, R. Rikards. – Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. – 410 p.
4. Becz S. Analysis of barely visible impact damage for aerospace structures / S. Becz, J. Hurtado, I. Lapczyk // ICCM-16 : 16th Int. Conf. on Composite Materials, 8-13 July 2007, Kyoto, Japan : Conf. Proc. – 2007. – p. 1-8.
5. Shchegel G.O. Probabilistic damage modelling of textile-reinforced thermoplastic composites under high velocity impact based on combined acoustic emission and electromagnetic emission measurements / G.O. Shchegel, R. Böhm, A. Hornig, V.V. Astanin, W.A. Hufenbach // Int. J. Impact Engineer. – 2014. – vol. 69. – p. 1-10.
6. Simulia Abaqus User Subroutines Reference Manual / Simulia. – Providence: Dassault Systems, 2012. – 591 p.
7. Böhm R. Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe / R. Böhm // Diss. akad. Grad. Dr.-Ing. – Technische Universität Dresden. – 2008. – 123 p.
8. Щегель Г.О. Деформування та руйнування пластин із композиційних матеріалів при ударному навантаженні / Г.О. Щегель // автореф. дис. канд. техн. наук : 01.02.04.–2013.–20 с.
9. Böhm R. A phenomenologically based damage model for textile composites with crimped reinforcement / R. Böhm, M. Gude, W. Hufenbach // Compos.Sci.Technol.–2010.–vol. 70.–p. 81-87.