

УДК 539.3/.5:620.178.7

Астанін В.В., Щегель Г.О.

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведені дослідження з моделювання взаємодії багатокомпонентних матеріалів при високих швидкостях удару на основі ймовірного підходу до врахування процесів руйнування і відновлення зв'язків у композиті при чисельному моделюванні методом скінченних елементів. Результати показали наближення даних чисельного розрахунку до отриманих шляхом експериментального дослідження порівняно із застосуванням традиційного підходу.

Ключові слова: удар; текстильнозміцнені композити; гібридоволоконні матеріали; енергопоглинання; скінченноелементне моделювання; захисні конструкції.

Постановка проблеми та аналіз відомих досліджень

Композиційні матеріали, особливо сучасні текстильнозміцнені ламінати, при виготовленні яких застосовуються складні технології формування двовимірного чи тривимірного плетеного каркасу армуючої фази, володіють високими міцнісними характеристиками не лише при статичному, але і при динамічному навантаженні [1, 2]. Проте їх багатокомпонентна структура призводить до суттєвих складнощів надійного моделювання поведінки виготовлених із них конструкцій, так як вимагає врахування впливу суттєвих для забезпечення міцності композиту процесів на міжфазних границях армуючого волокна і матриці на механічну поведінку матеріалу як цілого. Такі процеси розриву і відновлення зв'язків між компонентами композиту, як показано у попередніх роботах [3, 4], являються ймовірнісними за своєю природою, їх вплив особливо важливо врахувати в критичних умовах навантаження.

Текстильнозміцнені композиційні матеріали являють собою волоконнозміцнені матеріали, в яких армуюча фаза, а саме пучки волокон всього ламінату чи окремих його шарів, у вихідному стані (перед затвердінням фази зв'язуючого) пов'язані між собою шляхом переплетення того чи іншого типу, формуючи структуру, яка забезпечує перерозподіл докладеного до неї навантаження в двох (2D-текстильнозміцнені композити) чи трьох (3D-текстильнозміцнені композити) лінійно незалежних напрямках. У зв'язку зі складністю створення 3D-структур армуючої фази із значною протяжністю у трьох вимірах, широкого розповсюдження набули багатошарові ламінати, окремі шари яких являються текстильнозміцненими, проте між собою вони поєднуються лише за рахунок зв'язуючого, формуючи ламінований матеріал.

Текстильнозміцнені ламінати на основі скловолокна та полімерної матриці як типові представники класу багатокомпонентних композитів характеризуються пружною поведінкою до настання руйнування [5, 6]. Поведінка матеріалів розглянутого типу під



дією ударних навантажень вивчалась у [7, 8]. У роботах [9, 10] описано застосування моделі деградації жорсткості матеріалу при розвитку пошкодження під навантаженням, адаптованої до застосування в рамках скінченно-елементного програмного комплексу чисельного розрахунку методом скінченних елементів. В роботах [11, 12] подана адаптована для текстильнозміцнених ламінатів модель поведінки матеріалу. Проте більшість існуючих моделей вимагає використання параметрів та коефіцієнтів, які надзвичайно складно піддаються еспериментальному визначенню. Ламінати внаслідок своєї будови являються несучільними, неоднорідними і анізотропними. Проте при переході від розгляду на мікро- і мезорівні до макрорівня виготовлених із матеріалу конструктивних елементів доцільно розглядати даний елемент як однорідне анізотропне тіло. Постає завдання розробки моделей поведінки гомогенізованих аналогів, що враховують фізичні процеси, які в дійсності відбуваються у матеріалі при навантаженні.

Моделювання поведінки матеріалу

В основі теорії багатошарових ортотропних пластин та оболонки, які представляють собою конструкції із ламінованих текстильнозміцнених композитів, покладені співвідношення теорії пружності:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, \dots, 3, \quad (1)$$

де σ_{ij} , ϵ_{kl} – тензори напруження і відносної деформації у лагранжевій прямокутній системі координат; C_{ijkl} – матриця жорсткості. Застосовуючи правило запису за Фойгтом, можемо представити (1) у вигляді:

$$\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j, \quad i, j = 1, \dots, 6, \quad (2)$$

або, спрощуючи для випадку ортотропної анізотропії, отримуємо

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= C_{11}\epsilon_1 + C_{12}\epsilon_2 + C_{13}\epsilon_3; \\ \sigma_2 &= C_{12}\epsilon_1 + C_{22}\epsilon_2 + C_{23}\epsilon_3; \\ \sigma_3 &= C_{13}\epsilon_1 + C_{23}\epsilon_2 + C_{33}\epsilon_3; \\ \tau_{12} &= 2C_{66}\gamma_{12}; \quad \tau_{13} = 2C_{55}\gamma_{13}; \\ \tau_{23} &= 2C_{44}\gamma_{23}, \end{aligned} \quad (3)$$

де σ_p , τ_{ij} – компоненти тензора напружень; ϵ_p , γ_{ij} – компоненти тензора деформацій; C_{ij} – параметри жорсткості, які можна представити через значення модулів Юнга E_p , зсуву G_i та коефіцієнтів Пуассона ν_{ij} за відповідними напрямками:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_1(1-\nu_{23}\nu_{32})}{1-\nu^2}; C_{22} = \frac{E_2(1-\nu_{13}\nu_{31})}{1-\nu^2}; C_{33} = \frac{E_3(1-\nu_{12}\nu_{21})}{1-\nu^2}; \\ C_{12} &= C_{21} = \frac{E_1(\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{31})}{1-\nu^2} = \frac{E_2(\nu_{12}-\nu_{13}\nu_{32})}{1-\nu^2} = C_{66}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{23} &= C_{32} = \frac{E_2(\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{12})}{1-\nu^2} = \frac{E_3(\nu_{23}-\nu_{21}\nu_{13})}{1-\nu^2} = C_{44}; \\ C_{31} &= C_{13} = \frac{E_3(\nu_{13}-\nu_{12}\nu_{23})}{1-\nu^2} = \frac{E_1(\nu_{31}-\nu_{32}\nu_{21})}{1-\nu^2} = C_{55}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\nu^2 = \nu_{12}\nu_{21} + \nu_{23}\nu_{32} + \nu_{31}\nu_{13} + 2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}.$$

Механіка пошкодження розглядає утворення дефектів репрезентативного елемента об'єму за допомогою введення тензора пошкоджень D_{ij} на основі принципу еквівалентності деформацій. Згідно з цим принципом, пошкоджений матеріал під дією номінального напруження σ описується тими ж визначальними рівняннями матеріалу, що і непошкоджений матеріал під дією ефективного напруження $\tilde{\sigma}$, пов'язаного з σ за допомогою тензора пошкоджень D_{ij} . Це дозволяє записати закон деформування матеріалу наступним чином:

$$\tilde{\sigma}_i = D_{ij}\sigma_j = D_{ij}C_{jk}\epsilon_k = \tilde{C}_{ij}(D_{ij})\epsilon_j, \quad (5)$$

де \tilde{C}_{ij} – тензор ефективної жорсткості, який залежить від тензора пошкоджень D_{ij} . Критерії міцності F_{ij}^{tc} необхідні в рамках механіки пошкодження для визначення початку втрати жорсткості, що можна представити як $\Delta C_{ij} \neq 0$. У даному випадку тензорна величина ΔC_{ij} представляє втрату жорсткості і пов'язує жорсткість непошкодженого матеріалу C_{ij} з ефективною жорсткістю \tilde{C}_{ij} :

$$C_{ij} = \tilde{C}_{ij} + \Delta C_{ij}. \quad (6)$$

Результати розрахунків, отримані за допомогою механіки пошкодження і механіки руйнування, можуть бути співставлені шляхом порівняння величини енергії, розсіяної при розвитку пошкодження. Тим не менше, визначальні рівняння матеріалу повинні враховувати зростання цієї величини при зміцненні, пов'язане з підвищеною швидкістю деформації. Зменшення напруження після ініціації пошкодження таким чином, щоб врахувати вказану енергію, поглинуту матеріалом після початку пошкодження і до моменту остаточної втрати міцності, можна шляхом зменшення жорсткості матеріалу, для чого розраховують відповідний параметр пошкодження δ .

На основі досліджень, проведених за допомогою розробленого лабораторного комплексу, як описано в [3, 4], було запропоновано враховувати взаємно протилежний вплив імовірнісних процесів руйнування p_I та відновлення p_{II} зв'язків між структурними елементами матеріалу при ударі на основі отриманих експериментально співвідношень для відповідних параметрів пошкодження $\theta_I(E_0)$ та $\theta_{II}(E_0)$. Тоді залежність (2) приймає вигляд:

$$\sigma_{ij} = \tilde{Q}_{ijkl} (D_{ij}^*, \dot{\epsilon}_{ij}) \epsilon_{kl}, \quad (7)$$

де $\dot{\epsilon}_{ij}$, ϵ_{ij} , σ_{ij} – тензори швидкості деформації, деформації та напруження в лагранжевій прямокутній системі координат; \hat{Q}_{ijkl} – матриця ефективної жорсткості; D_{ij}^* – тензор пошкоджень, розрахований, на відміну від (2), із врахуванням імовірнісних процесів руйнування і відновлення зв'язків структурних елементів у матеріалі:

$$D_{ij}^* = \begin{cases} 0 & \text{при } P = f(\theta_I, \theta_{II}, \dot{\epsilon}_{ij}); \\ 1 & \text{при } Q = 1 - P, \end{cases} \quad (8)$$

де P – імовірність відновлення вказаних зв'язків; Q – імовірність протилежної події, а саме незворотного пошкодження.

Перехід від конкретних умов проведення дослідів, в яких визначались складові імовірності $p_i = f(\theta_i) = f(W_{a,e}, f_a^m, E_0)$, де $W_{a,e}$ – енергія електромагнітного та акустичного емісійних сигналів; f_a^m – виділена аналізом кратна частота; E_0 – початкова енергія удару, до узагальнених залежностей $p_i = f(\dot{\epsilon}_{ij}, v_b)$, де v_b – балістичний ліміт як параметр матеріалу, необхідний для розрахунку при високих швидкостях удару, відбувався шляхом ітераційного перерозрахунку еквівалентної усередненої по задіяних у пошкодженні розрахункових точках швидкості деформації $\dot{\epsilon}_{ieq}^{tc}$ модельованого зразка під час моделювання методом скінченних елементів. За аналогією із відомими з літератури співвідношеннями, які дозволяють врахувати вплив окремих компонентів тензора деформацій на формування пошкодження на розтяг, втрату стійкості, жолоблення, утворення перегинів волокон на стиск, а також утворення тріщин у матриці на розтяг і зсув та руйнування і роздроблення матриці на стиск і зсув, еквівалентні значення швидкості деформації $\dot{\epsilon}_{ieq}^{tc}$ розраховуються, зокрема, для пошкодження на розтяг як

$$\dot{\epsilon}_{11eq}^t = \sqrt{\langle \dot{\epsilon}_{11} \rangle^2 + \dot{\epsilon}_{12}^2}, \quad (9)$$

де $\langle \beta \rangle = 0,5 \cdot (\beta + |\beta|)$ – оператор Маколея для кожного дійсного β .

Таким чином, формула для розрахунку параметрів тензора пошкодження D_{ij}^* приймає вигляд:

$$D_{ij}^* = \begin{cases} 0 & \text{при } P = p_I(\dot{\epsilon}_{ij}) + p_{II}(\dot{\epsilon}_{ij}, v_b); \\ 1 & \text{при } Q = 1 - p_I(\dot{\epsilon}_{ij}) - p_{II}(\dot{\epsilon}_{ij}, v_b). \end{cases} \quad (10)$$

Запропонований підхід дозволяє при проведенні розрахунків змоделювати ймовірнісні процеси руйнування і відновлення зв'язків у матеріалі, які безпосередньо визначають механічну поведінку матеріалу при його деформуванні та пошкодженні. При засто-

суванні запропонованої ймовірнісної моделі після виконання умови досягнення виразом для критерію міцності F_{ij}^{tc} граничного значення розраховується еквівалентна швидкість деформації $\dot{\epsilon}_{ieq}^{tc}$ відповідно до (9), а на її основі компоненти тензора пошкоджень набувають значень, які відповідають вичерпанню ресурсу міцності скінченного елемента (розрив зв'язків між структурними елементами матеріалу, $d_{ij}^{tc} = 1$) або ж відсутності розриву таких зв'язків чи їх відновленню ($d_{ij}^{tc} = 0$) із відповідною ймовірністю, як видно з формули (10).

З метою визначення доцільності застосування запропонованої ймовірнісної моделі поведінки матеріалу відповідний алгоритм розрахунку міцності було реалізовано у вигляді програмного модулю мовою Fortran. Моделювання поведінки матеріалу було здійснено із використанням стандартного програмного скінченноелементного розрахункового комплексу. Залежності поглиненої матеріалом енергії від швидкості удару приведені на рис.1. Отримані розрахункові значення поглиненої матеріалом енер-

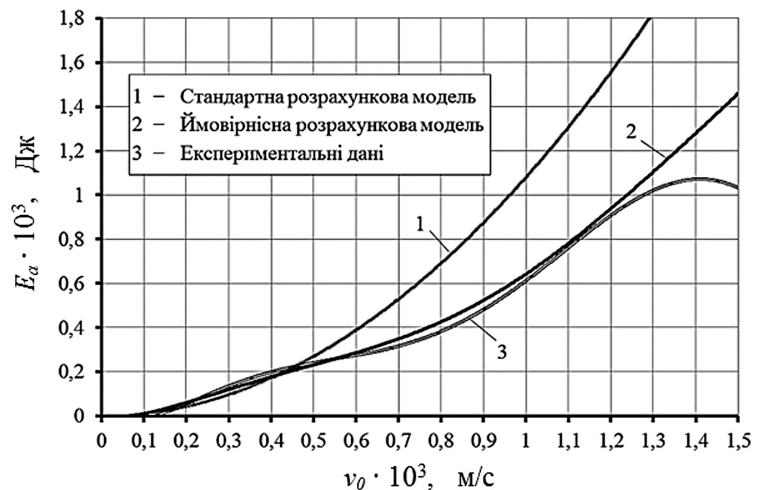


Рис. 1. Залежність поглиненої матеріалом зразка енергії від швидкості удару для 2D-текстильнозміцненого матеріалу

гії E_a за традиційним підходом (крива 1) виявляються завищені порівняно із результатами розрахунку за запропованою моделлю (крива 2) та експериментальними даними (крива 3).

Аналіз приведеної залежності дозволив зробити наступні висновки. Перевагами використання запропонованої моделі є зменшення відхилення величини поглиненої енергії удару за результатами чисельного моделювання поведінки матеріалу від експериментально отриманих даних порівняно з відомим стандартним підходом до розрахунку його поведінки більше ніж удвічі у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей удару. Розходження результатів чисельного розрахунку відносно експериментальних даних зменшено мінімум утричі при швидкостях до 1150 м/с за результатами застосуван-

ня запропонованої імовірнісної моделі. Крім того, її застосування дозволяє врахувати експериментально отримані дані щодо наявності областей підвищеного енергопоглинання в діапазоні швидкостей балістичного ліміту матеріалів, які не відображаються результатами моделювання з використанням стандартного підходу.

Висновки

На основі проведеного моделювання ударної взаємодії багатокомпонентних композитів при високих швидкостях удару було показано принципову можливість врахування в рамках чисельного моделювання методом скінченних елементів імовірнісних фізичних процесів руйнування і відновлення зв'язків, що мають місце у матеріалі при навантаженні. Такий підхід дозволить не лише відобразити реальну поведінку матеріалу при комп'ютерному розрахунку, але і відкриває перспективи глибшого розуміння поведінки матеріалу в критичних з точки зору міцності умовах навантаження за результатами порівняння результатів експериментальних та чисельних досліджень.

Література

- [1] Hufenbach W. Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications / W. Hufenbach, M. Gude, and C. Ebert // *Composites Science and Technology*. – 2009. – Vol. 69. – P. 1422-1426.
- [2] Hufenbach W. Strain rate dependent low velocity impact response of layerwise 3D-reinforced composite structures / W. Hufenbach, M. Gude, C. Ebert, M. Zscheyge, and A. Hornig // *International Journal of Impact Engineering*. – 2011. – № 38. – P. 358-368.
- [3] Astanin V.V. Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig, and A. Langkamp // *International Journal of Impact Engineering*. – 2012. – Vol. 49. – P. 22-30.
- [4] Астанин В.В. Деформирование и разрушение гибридных композиционных материалов при ударе / В.В. Астанин, А.А. Щегель // *Проблемы прочности*. – 2011. – № 6 (414). – P. 40-57.
- [5] Hinton M. J. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence / M. J. Hinton, A. S. Kaddour, P. D. Soden // *Composites Science and Technology*. – 2002. – Vol. 62. – P. 1725-1797.
- [6] Chang F. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations / F. Chang, K. Chang // *Journal of Composite Materials*. – 1987. – Vol. 21. – P. 834-855.
- [7] Deka L.J. Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact / L.J. Deka, S.D. Bartus, and U.K. Vaidya // *Journal of Materials Science*. – 2008. – Vol. 43. – № 13. – P. 4399-4410.
- [8] Choi H.Y. A new approach toward understanding damage mechanics and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact. Part II. Analysis / H.Y. Choi, H.Y. Wu, F.K. Chang // *Journal of Composite Materials*. – 1991. – Vol. 25. – P. 1012-1038.
- [9] Becz S. Analysis of barely visible impact damage for aerospace structures / S. Becz, J. Hurtado, and I. Lapczyk // *Materials of the 16th International conference on composite materials (ICCM-16)*, 8-13 July 2007. – Kyoto, Japan, 2007. – P. 1-8.
- [10] Lapczyk I. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials / I. Lapczyk and J.A. Hurtado // *Composites Part A*. – 2007. – Vol. 38. – P. 2333-2341.
- [11] Böhm R. Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe. – Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. – Technische Universität Dresden. – 2008. – 123 P.
- [12] Böhm R. A phenomenologically based damage model for 2D and 3D-textile composites with non-crimp reinforcement / R. Böhm, M. Gude, and W. Hufenbach // *Materials and Design*. – 2011. – Vol. 32. – P. 2532-2544.

Astanin V.V., Shchegel A.A.
National Aviation University. Ukraine, Kiev

MODELING OF IMPACT INTERACTION OF MULTICOMPONENT COMPOSITES AT HIGH VELOCITIES

Studies are carried out on modeling of multicomponent materials behaviour under high-velocity impact based on a probabilistic approach to accounting the processes of destruction and renewal of bonds in the composite during the numerical simulation by finite element method. Results showed approximation of numerical calculation data to those of experimental research compared to the traditional approach to numerical investigation of materials of this type.

Keywords: impact; textile-reinforced composites; hybrid-garn materials; energy absorption; finite element modeling; protective designs.

References

- [1] Hufenbach W. Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications / W. Hufenbach, M. Gude, and C. Ebert // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69. – P. 1422-1426.
- [2] Hufenbach W. Strain rate dependent low velocity impact response of layerwise 3D-reinforced composite structures / W. Hufenbach, M. Gude, C. Ebert, M. Zscheyge, and A. Hornig // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – № 38. – P. 358-368.
- [3] Astanin V.V. Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading / V.V. Astanin, G.O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig, and A. Langkamp // International Journal of Impact Engineering. – 2012. – Vol. 49. – P. 22-30.
- [4] Astanin V.V. Impact deformation and fracture of hybrid composite materials / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Strength Mater. – 2011. – vol. 43. – № 6. – p. 615-627.
- [5] Hinton M. J. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence / M. J. Hinton, A. S. Kaddour, P. D. Soden // Composites Science and Technology. – 2002. – Vol. 62. – P. 1725-1797.
- [6] Chang F. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations / F. Chang, K. Chang // Journal of Composite Materials. – 1987. – Vol. 21. – P. 834-855.
- [7] Deka L.J. Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact / L.J. Deka, S.D. Bartus, and U.K. Vaidya // Journal of Materials Science. – 2008. – Vol. 43. – № 13. – P. 4399-4410.
- [8] Choi H.Y. A new approach toward understanding damage mechanics and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact. Part II. Analysis / H.Y. Choi, H.Y. Wu, F.K. Chang // Journal of Composite Materials. – 1991. – Vol. 25. – P. 1012-1038.
- [9] Becz S. Analysis of barely visible impact damage for aerospace structures / S. Becz, J. Hurtado, and I. Lapczyk // Materials of the 16th International conference on composite materials (ICCM-16), 8-13 July 2007. – Kyoto, Japan, 2007. – P. 1-8.
- [10] Lapczyk I. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials / I. Lapczyk and J.A. Hurtado // Composites Part A. – 2007. – Vol. 38. – P. 2333-2341.
- [11] Böhm R. Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe. – Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. – Technische Universität Dresden. – 2008. – 123 P.
- [12] Böhm R. A phenomenologically based damage model for 2D and 3D-textile composites with non-crimp reinforcement / R. Böhm, M. Gude, and W. Hufenbach // Materials and Design. – 2011. – Vol. 32. – P. 2532-2544.