



Астанін В.В., Олефір О.І., Щегель Г.О., Олефір А.О.  
Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНОГО УДАРУ АРМОВАНИХ СІТКАМИ ПРУЖНИХ КОМПОЗИТИВ

*Розроблена адаптована для розрахунку еластичних армованих сітками композитів ймовірнісна модель деформування і руйнування матеріалу для чисельного розрахунку високошвидкісного удару методом скінченних елементів. Детально розглянута методика і особливості моделювання. Порівняння результатів розрахунку енергопоглинання із отриманими експериментальними даними показує доцільність застосування запропонованої моделі.*

*Ключові слова:* гнучкі еластичні композити; ударна міцність; МСЕ; сіткове армування; енергопоглинання; продавлювання матриці волокнами

### 1. Огляд досліджень і постановка задачі

У сфері проектування захисних композиційних матеріалів для захисного одягу, спорядження, щитів, рятувального обладнання і подібних елементів, особливе місце посідають текстильнозміцнені композити, здатні не лише витримувати значні навантаження, не руйнуючись, але і піддаватись при цьому суттєвим деформаціям без пошкодження або з мінімально можливими пошкодженнями їхньої структури [1]. Це дозволяє таким матеріалам повторно сприймати навантаження і деформуватись, забезпечуючи зміну форми і розмірів виготовленої із них конструкції, але повертатись до вихідних параметрів по можливості без суттєвого зниження міцності.

Характерною особливістю еластичних композиційних матеріалів є те, що при тих самих властивостях щодо протистояння руйнуванню під дією зовнішнього навантаження, тобто при тій самій міцності, прямий поперечний удар пластин із такого матеріалу характеризується значними поперечними деформаціями.

В [2] показано, що значний вплив при моделюванні удару відіграє врахування гнучкості пластини, яка призводить до переходу від локальної ударної взаємодії пластини з ударником до глобальної взаємодії всього зразку як такого. Відомо також, що за певних умов гнучкі волоконнозміцнені композиційні матеріали характеризуються підвищеним енергопоглинанням при поперечному ударі [1].

Розроблені і представлені раніше у [3] армовані сітками еластичні композити та їх аналоги [4], [5] являють собою близький до текстильнозміцнених композитів тип волоконнозміцнених матеріалів на основі гнучких пружних матриць, що характеризуються покращеними ударозахисними властивостями

ми [6]. Задачею даного дослідження стала розробка адаптованої для розрахунку еластичних композитів моделі матеріалу для чисельного розрахунку методом скінченних елементів.

### 2. Досліджені матеріали

Дане дослідження присвячено моделюванню такого типу композиційних матеріалів, які характеризуються ключовими властивостями гнучкості та одночасно пружності, що є важливими для сфер їх практичного застосування. При цьому під гнучкістю розуміють здатність матеріалу під дією зовнішніх навантажень, а саме докладених сил чи моментів, піддаватись без руйнування (тобто без незворотного розриву механічних зв'язків між його структурними елементами) зміні своєї форми і розмірів внаслідок зміни кутових відстаней між окремими ділянками чи областями, які умовно можна виділити по площі його поверхні чи по його об'єму, причому із виникненням таких напружень всередині матеріалу, які призводять до відновлення його форми і розмірів після зняття вказаного зовнішнього навантаження (пружна гнучкість) або не призводять до цього (власне гнучкість або згинальність). Під пружністю розуміють здатність матеріалу під дією зовнішніх навантажень піддаватись без руйнування зміні своєї форми і розмірів внаслідок зміни лінійних (пружність на розтяг) чи кутових (наприклад, пружність на зсув) відстаней між окремими його ділянками чи областями із виникненням напружень всередині матеріалу, які призводять до відновлення його форми і розмірів після зняття зовнішнього навантаження. Варто зазначити, що від терміну, який стосується зміни саме лінійних розмірів і позначається як розтягливість чи розтяжність, пружність відрізняється саме здатністю до

відновлення початкової форми і розмірів. Згідно з [7] терміном, що поєднує вказані властивості гнучкості і пружності на розтяг матеріалу, є еластичність. Отже, надалі розглядається моделювання поведінки еластичних матеріалів.

Текстильнозміцнені композиційні матеріали в даний час переважно виготовляються у вигляді пластин чи оболонок, зміцнених умовно нескінченними волокнами із певним переплетенням (зазвичай типовим для текстильної промисловості). Ламіновані композиційні матеріали (ламінати) на основі текстильнозміцнених шарів, таким чином, також представляють собою пластини чи оболонки. В даному дослідженні розглядаються властивості матеріалу як такого, тому, щоб уникнути впливу форми матеріалу, що зокрема пов'язано із нерівномірністю розподілу волокон і шарів, досліджуються зразки, що представляють собою круглі чи прямокутні пластини.

Зауваження щодо форми зразків стосуються і запропонованих в [3], досліджених в даній статті сіткозміцнених матеріалів. Одним із завдань сіткового зміцнення є забезпечення еластичності матеріалу при збереженні міцності, в тому числі, залежно від конкретного типу сітки, міцності в напрямку, перпендикулярному до площини пластини композиту (3D-зміцнення). Тим не менше, технологічно при виготовленні сітка, так само як і текстиль, формується на двовимірній основі. І навіть у випадку застосування спеціальних способів тривимірного плетіння [8], іноді вдається при проведенні чисельних розрахунків поведінки композиту застосовувати двовимірні елементи і відповідні призначені для пластин і оболонок моделі матеріалу, що дозволяє суттєво спростити розрахунки.

Армування композитів на основі полімерних матриць плетеними вугле-, скловолоконними чи іншими сітками дозволяє, з точки зору міцності матеріалу, забезпечити сумісну роботу усіх систем зміцнюючих волокон і перерозподіл напружень при докладанні навантаження між ними не лише за рахунок адгезії матриці і волоконного зміцнення, але і за рахунок формування волоконним зміцненням єдиної силової каркасної сітки всередині матеріалу. Навантаження, докладені до однієї із систем волокон, передаються на інші завдяки їх нерухомому, хоча припустимо гнучкому, з'єднанню у вузлах, що різко знижує вимоги до якості адгезії, хімічного чи фізичного зв'язку волокон і матриці, поверхневого шару між ними. Армування сітками дозволяє вирішити проблеми створення композитів із металевою матрицею і вуглецевим волоконним зміцненням чи на основі гібридних волокон, традиційно пов'язані зі слабкою адгезією вказаних матеріалів.

Додатковими механізмами пошкодження волоконнозміцнених композиційних матеріалів із вузловим сітчастим армуванням [3] являється, у дода-

ток до виривання волокон, продавлювання волокон суміжних волоконних систем через матеріал матриці. Це сприяє підвищеному енергопоглинанню матеріалу при статичному та динамічному навантаженні. Таким чином, пружні армовані сітками композиційні матеріали характеризуються покращеними функціями роботи під навантаженням, що дозволяє застосовувати їх у ширшому діапазоні експлуатаційних навантажень, в тому числі для захисту від удару.

Характерною особливістю сіткового зміцнення є нерухоме з'єднання волокон у вузлах, якими є ділянки максимального наближення волокон, які належать різним армуючим жмутам чи системам, один до одного, причому нерухомість з'єднання не виключає його гнучкості, проте передбачає фактичне унеможливлення взаємного прослизання волокон або жмутів волокон у вузлі.

### 3. Побудова чисельної моделі сіткозміцненого матеріалу

Особливістю роботи під навантаженням гнучких еластичних матеріалів, як показано у [6], являється наявність двох фаз взаємодії із матеріалом. Аналогічні фази мають місце і при навантаженні сіткозміцнених композитів. Перша фаза визначається процесами початкової деформації матриці і одночасного випрямлення волоконного армуючого полотна без деформації самих волокон. Тобто деформація армуючого полотна у першій фазі процесу навантаження є структурною. Друга фаза характеризується деформацією в тому числі волокон, що забезпечує сумісну роботу волокна і матриці із традиційним взаємним перерозподілом напружень.

З аналітичної точки зору задача деформування ортотропної пластини композиційного ламінату під дією поперечного удару описується наступними рівняннями [2]:

$$D_{11} \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2} + D_{66} \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial y^2} + (D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x \partial y} - kA_{55} (\psi_x + \frac{\partial w}{\partial x}) = \frac{\rho \cdot h^3}{12} \cdot \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2},$$

$$(D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x \partial y} + D_{22} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial y^2} + D_{66} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} - kA_{44} (\psi_y + \frac{\partial w}{\partial y}) = \frac{\rho \cdot h^3}{12} \cdot \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2},$$

$$kA_{55} (\frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) + kA_{44} (\frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) + p(x, y, t) = \rho \cdot h \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

де  $D_{ij}$ ,  $A_{ij}$  – тензори жорсткості ламінованої пластини матеріалу на згин і поперечний зріз [9];  $\rho$  – густина матеріалу;  $h$  – товщина пластини;  $w$  – поперечний прогин;  $\psi_x$ ,  $\psi_y$  – кутова деформація пластини на зсув, викликана тим, що площини, перпендикуляр-



ні серединній площині оболонки, не залишаються перпендикулярними їй після деформації [10], [11];  $x, y$  – просторові координати у площині пластини;  $p$  – питоме поперечне навантаження на одиницю площі пластини;  $k$  – коефіцієнт корегування жорсткості на зсув за Міндліном [12], [13];  $t$  – час.

Крайові умови для розглядуваного випадку поперечно докладеного навантаження до защемленої по краю пластини розміром  $axb$  із початком координат, розташованим у центрі пластини [2]:

$$w=0, \psi_x=0 \text{ при } x=\pm\frac{a}{2} \text{ і } w=0, \psi_y=0 \text{ при } y=\pm\frac{b}{2}.$$

При проведенні чисельного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) постала потреба розробки спеціалізованої моделі матеріалу, адаптованої для розрахунку саме армованих сітками пружних композитів із врахуванням вище приведених особливостей їх ударної взаємодії. Критерій вибору програмного комплексу (ПК) полягав у можливості застосування оригінальних користувачьких моделей матеріалу в рамках процедури розрахунку за допомогою МСЕ, що передбачено у ПК «Abaqus».

На першому етапі моделювання визначають геометрію взаємодіючих тіл, докладені до них силові навантаження, обмеження ступенів вільності. Тип моделі взаємодіючих тіл – тривимірна (3D). Ударник – абсолютно жорстке тіло (Analytical rigid), тому має сенс задати лише його недеформівну поверхню як оболонковий елемент (Revolved shell) та масу, що визначається у базисній точці (Reference Point). Композиційна пластинка задається як деформівна оболонка у площині (Deformable Shell, Planar). З метою подальшого розбиття круглої пластини на скінченні елементи в геометрії пластини виділяється центральна область, зазвичай квадратної форми для ортотропної пластини, та промені, що сполучають кути квадратної центральної області із краєм пластини.

Для моделювання SE композиційної пластини, обираємо оболонкові елементи загального призначення (для тонких і товстих пластин), що передбачені у обраному ПК для розрахунків методом явного інтегрування. Використання оболонкових елементів, як відомо, можливе, якщо один вимір об'єкту (товщина пластини) значно менше, ніж два інші (розміри пластини у площині), і якщо напруженнями в напрямку товщини можна знехтувати, що має місце за умови прийняття гіпотез Кірхгофа-Лява для теорії пластин і оболонок. З поміж власне оболонкових і континуальних оболонкових елементів обираємо власне оболонкові (conventional shell), так як геометрія пластини, на відміну від, наприклад, циліндричної оболонки, передбачає незмінні розміри кожного елемента по товщині пластини (тобто відсутні початкові значні викривлення поверхні).

Стосовно методу інтегрування, якщо для задач статички знаходження стану системи  $\Phi(t + \Delta t)$  в момент часу  $t + \Delta t$  можна здійснити за умови вибору не надмірно малого кроку інтегрування по часу  $\Delta t$  і з припустимою похибкою лише методом неявного інтегрування (implicit analysis), тобто шляхом вирішення рівняння виду  $\Psi(\Phi(t), \Phi(t + \Delta t)) = 0$ , де  $\Phi(t)$  – стан системи в момент часу  $t$ , то для задач динаміки, як відомо, достатньо застосування методу явного інтегрування (explicit analysis), що передбачає безпосереднє вирішення рівняння виду  $\Phi(t + \Delta t) = Y(\Phi(t))$  [14].

SE пластини внаслідок удару піддаватимуться очевидно суттєвим лінійним деформаціям розтягу, тому використовуються оболонкові елементи типу S4 або S4R, що враховують скінченні мембранні деформації («finite-membrane-strain»). Першому із них надається перевага, так як він забезпечує вищу точність розрахунків («fully integrated», застосовується більша кількість вузлів при чисельному інтегруванні методом Гаусса), зокрема при можливому згинанні в площині серединної поверхні ламінату або при виникненні в процесі розрахунку невідповідних дійсності хибних деформацій скінченного елемента (т.з. «hourglassing»), при яких потенціальна енергія зміни об'єму рівна нулю, так як вони пов'язані зі зміною не об'єму SE, а його форми, у випадку, якщо жорсткість до супротиву скінченим елементом формозміні не передбачена. Другий тип («reduced integrated») попри іноді меншу точність потребує менше обчислювальних ресурсів.

Крім того, згідно з рекомендаціями [14], доцільним є також застосування оболонкових елементів, розрахованих на малі мембранні деформації («small-membrane-strain»), проте придатних до врахування дуже значних кутів повороту. Таким являється SE типу S4RSW, що враховує, крім іншого, викривлення («warping»), під яким розуміють степінь відхилення серединної поверхні SE від плоскої площини внаслідок деформації.

Крок інтегрування по часу обирається пробним шляхом так, щоб уникнути чисельної нестабільності розрахунку, зокрема помилки, пов'язаної із перевищенням обмеження по значенню допустимого повороту SE протягом одного кроку («excessive incremental rotation»), і становить  $\Delta t = 10^{-6}$  с.

Кінематичні обмеження системи взаємодіючих тіл – задана початкова швидкість  $v_0$  ударника у напрямі пластини і защемлення по контуру пластини.

Характеристики поперечного перерізу композиційної пластини включають дані про сумарну товщину, прив'язку базисної площини оболонки до серединної площини, товщину і орієнтацію складових шарів ламінату, а також вказівку на матеріал кожного шару. За основу при програмуванні користувачької моделі матеріалу VUMAT була взята



Рис. 1. Реалізація ймовірнісної моделі пошкодження композиційного матеріалу за методом Монте-Карло

модель волоконнозміцненого композиту за Хашином [15], [16], [17].

Моделювання ймовірнісних параметрів пошкодження здійснювалось у відповідності до алгоритмів, представлених у [18], [19], [20], що були доповнені модулями для опису дворівневої реакції матеріалу на навантаження, як описано вище, а також забезпечена взаємодія елементів матеріалу у поздовжньому та поперечному напрямку у площині ламінату, що відповідає сумісній роботі армувальних систем волокон сіток. На рис. 1 представлено застосований при моделюванні у користувацькій підпрограмі алгоритм розрахунку за методом Монте-Карло.

#### 4. Результати експериментів і їх аналіз

Чисельні експерименти проводились з метою оптимізації запропонованої моделі сіткозміцненого матеріалу. На рис. 1 приведена залежність поглинутої матеріалом енергії від початкової енергії удару за результатами розрахунків, а саме із застосуванням моделі волоконнозміцненого матеріалу із критерієм міцності за Хашином [15], ймовірнісної моделі деформування і пошкодження [19], а також розробленої моделі еластичного сіткозміцненого матеріалу, і експерименту.

Дослідні дані отримані у серії установчих експериментів, проведених із застосуванням лабораторної установки «aSTanin» («Acceleration System for Testing of Antidamage Innovations») [6] при швидкостях до 600 м/с із застосуванням сталевого ударника зі сферичною носовою частиною діаметром  $4,5 \cdot 10^{-3}$  м масою 0,0027 кг. Діаметр

зразків матеріалу  $D = 0,1$  м, діаметр робочої області зразків матеріалу  $D_0 = 0,075$  м, товщина матеріалу  $t = 0,002$  м. Кріплення зразка матеріалу – заземлення по колу.

Як видно із рис. 2, стандартна вбудована в ПК модель розрахунку волоконнозміцнених композитів за вище прогнозоване енергопоглинання ламінату, що має небезпечні наслідки при розрахунку і проектуванні захисних конструкцій. Розроблена авторами раніше ймовірнісна модель деформування і пошкодження [19] вирішує цю проблему, проте вона розрахована для моделювання текстильнозміцнених композиційних матеріалів. Як вбачається із результатів установчого експерименту, при незмінних властивостях жорсткості і міцності сіткозміцнене волоконне армування забезпечує при ударі ефективніший перерозподіл енергії удару, що сприяє підвищенню енергопоглинаючих властивостей при одночасному зростанні деформацій, що пов'язано із більшою еластичністю матеріалу.

Відповідна залежність похибки розрахунку залишкової енергії ударника як  $\chi = (E_m - E_e)/E_e$ , де  $E_m$  і  $E_e$  – розрахункове і експериментальне значення залишкової енергії ударника, від початкової швидкості удару приведена на рис. 3. Характер отриманих залежностей підтверджує припущення, приве-

мування і пошкодження [19] вирішує цю проблему, проте вона розрахована для моделювання текстильнозміцнених композиційних матеріалів. Як вбачається із результатів установчого експерименту, при незмінних властивостях жорсткості і міцності сіткозміцнене волоконне армування забезпечує при ударі ефективніший перерозподіл енергії удару, що сприяє підвищенню енергопоглинаючих властивостей при одночасному зростанні деформацій, що пов'язано із більшою еластичністю матеріалу.

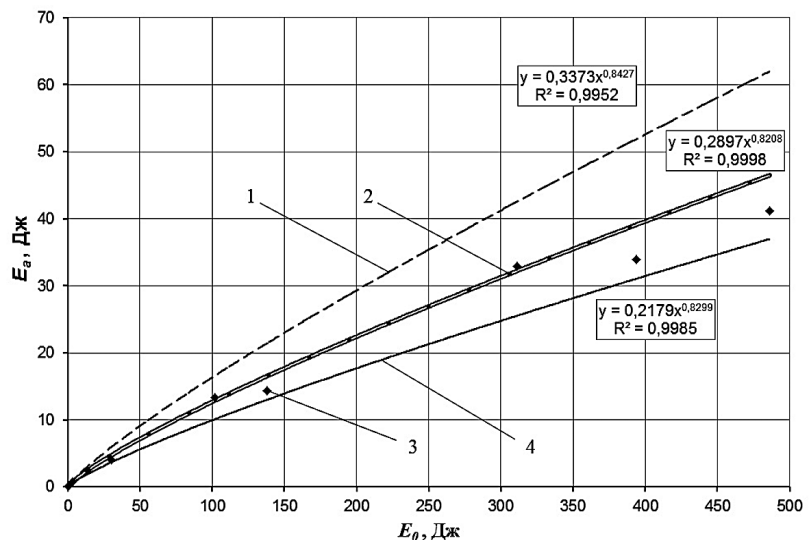
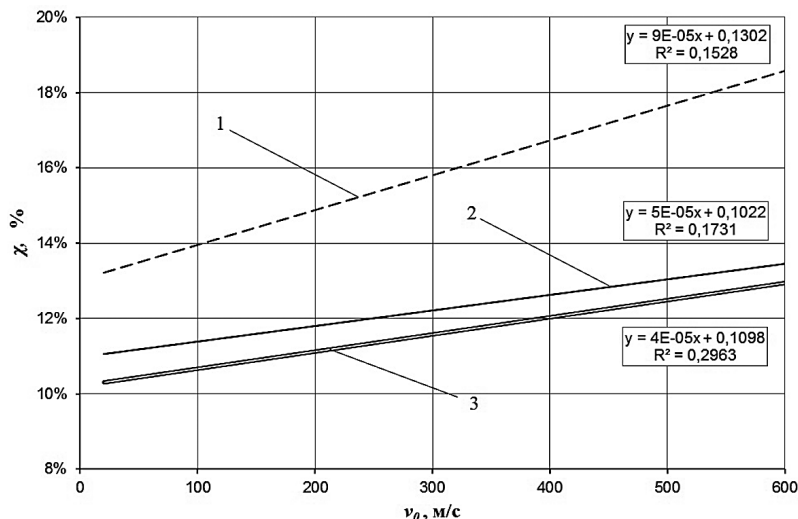


Рис. 2. Поглинута матеріалом енергія в залежності від початкової енергії удару за результатами розрахунків і експерименту: 1 – модель волоконнозміцненого матеріалу із критерієм міцності за Хашином [15]; 2 – розроблена модель еластичного сіткозміцненого матеріалу; 3 – експериментальні дані; 4 – ймовірнісна модель деформування і пошкодження [19]



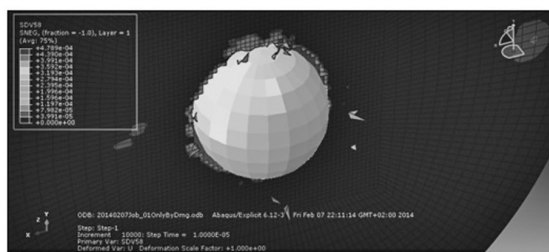


**Рис. 3.** Залежність похибки розрахунку залишкової енергії ударника від початкової швидкості удару: 1 – стандартна модель волоконнозмцненого матеріалу; 2 – ймовірна модель деформування і пошкодження; 3 – розроблена модель еластичного сіткозмцненого матеріалу

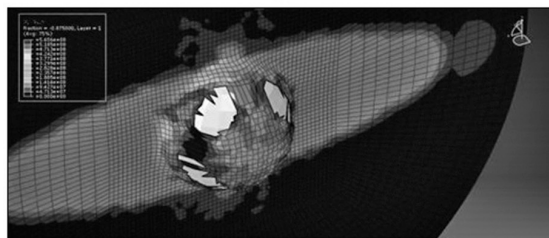
дені у [21] на основі експериментальних даних, а також [22] і [23] щодо характеру залежностей енергопоглинання гнучкими композиційними матеріалами при ударі. Особливу увагу слід звернути на критичний діапазон швидкостей удару, що охоплюють перехідні процеси в області швидкості балістичного ліміту матеріалу. Дані про двократний перелам кривої, приведені у [22], знаходять своє експериментальне підтвердження у відомостях про локальні області підвищеного енергопоглинання [24], а також попередньо підтверджуються для еластичних сіткозмцнених композитів проведеними установчими експериментами. Моделювання локальних областей підвищеного енергопоглинан-

ня покращує характеристики матеріалу щодо опору руйнуванню при ударному навантаженні.

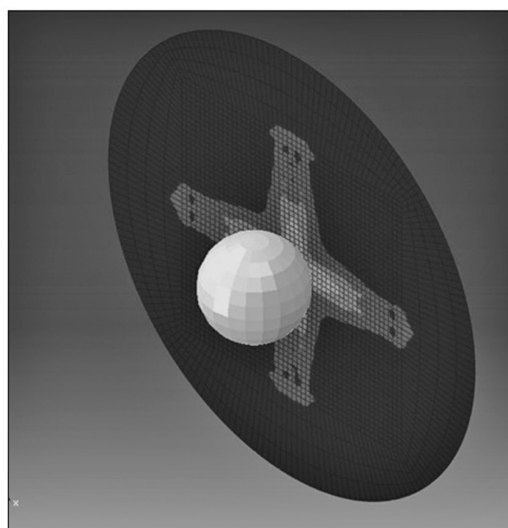
Рис. 4, б ілюструє ізополе пошкоджень композиту при врахуванні еластичності, проте без взяття до уваги особливостей щодо ефективного перерозподілу енергії удару між взаємно перпендикулярними системами волокон, тобто між зміцнюючими волокнами вздовж і поперек пластини. Це пояснює визначальну направленість пошкодження. Тим не менше, відсутній ефект передчасного руйнування матеріалу при першому перевищенні критичної величини критерію міцності, що призводило до локалізації ударної взаємодії у першому випадку, так як враховується залишкова міцність ламінату.



а



б



в

**Рис. 4.** Етапи адаптації моделі волоконнозмцненого матеріалу для еластичних сіткозмцнених матеріалів: а – стандартна модель волоконнозмцненого матеріалу; б – моделювання двоступінчатого характеру сприйняття навантаження еластичними композитами; в – моделювання сумісної роботи взаємно перпендикулярних ниток волоконного армування

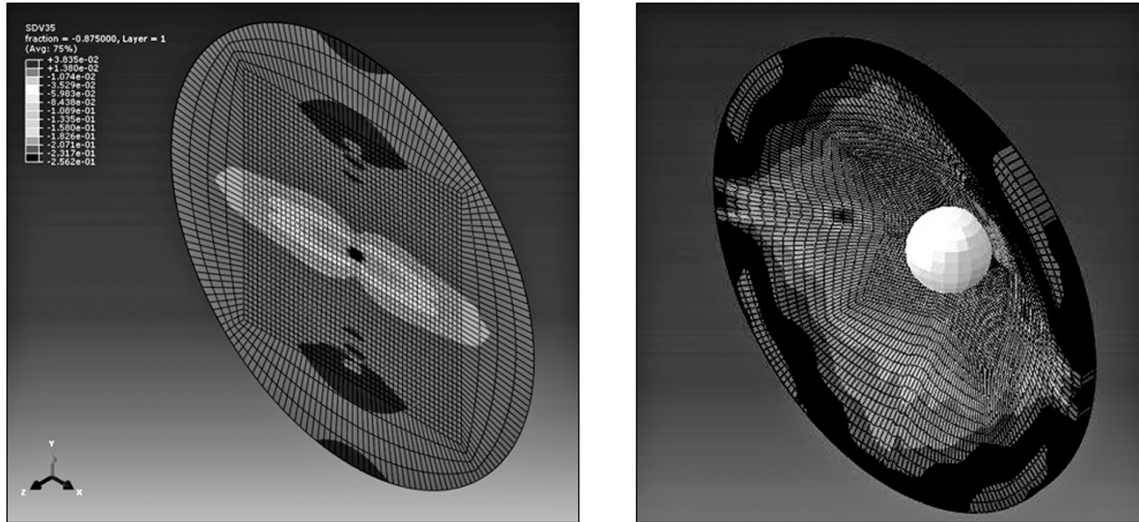


Рис. 5. Изополя напряжений в плоскости пластины из эластичного сеткозміцненого ламінату при ударі на докритичних швидкостях: *a* – стандартна модель волоконнозміцненого матеріалу; *b* – розроблена модель еластичного сеткозміцненого матеріалу

Руйнування відбувається в області максимальних напружень на зсув у площині ламінату, що відповідає низьким параметрам міцності полімерної матриці. Якщо ж враховувати перерозподіл напружень без урахування еластичності, отримуємо розрахункові ізополя пошкодження, як показано на рис. 4, *в*.

Ізополя напружень у площині ламінату, що виникають при швидкості нижче балістичного ліміту, отримані розрахунками із застосуванням стандартної моделі волоконнозміцненого матеріалу і розробленої адаптованої моделі, показані на рис. 5, *a, б*. Як видно з рисунку, запропонована модель дозволяє не лише отримати краще наближення даних чисельного моделювання енергопоглинання до дослідних даних, як показано вище, але і наблизити

інші параметри, такі як деформація на розтяг, стиск і зсув, величини і кути прогину, загальний структурний характер поведінки матеріалу, до встановлених дослідним шляхом.

Наступним кроком стала перевірка коректності моделювання структурного відгуку еластичних сеткозміцнених пластин при швидкостях близьких до балістичного ліміту матеріалу і вищих за неї. На рис. 6 показано ізополя пошкодження, отримані із застосуванням ймовірнісної моделі деформування і пошкодження [19] та розробленої адаптованої моделі поведінки сеткозміцнених ламінатів при швидкості удару  $v_0 = 140$  м/с, що наближається до швидкості балістичного ліміту матеріалу, проте не перевищує його.

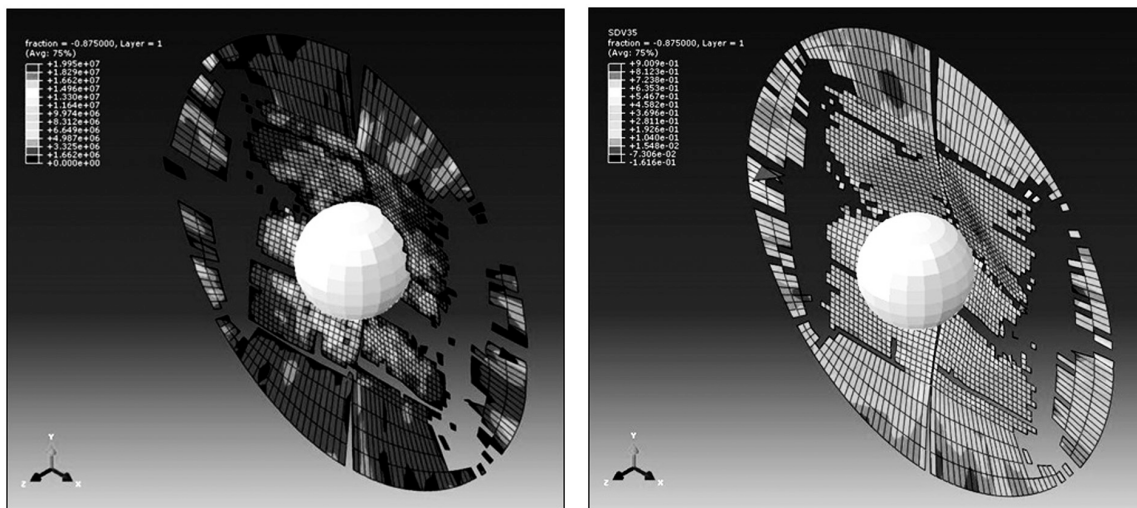


Рис. 6. Изополя параметру пошкодження у площині пластины из эластичного сеткозміцненого ламінату у критичному діапазоні швидкостей удару: *a* – ймовірнісна модель деформування і пошкодження [19]; *b* – розроблена модель еластичного сеткозміцненого матеріалу



Руйнування значної кількості СЕ відповідає суттєвому збільшенню площі граничного пошкодження матеріалу. Матриця фактично зруйнована, проте енергія руху ударника цілком поглинута на руйнування матриці, частина її трансформована у потенціальну енергію деформації і коливань пластини, а також частково на руйнування окремих волокон. Енергія удару ефективно перерозподіляється поміж ще цілими волокнами навіть незважаючи на практично повну втрату міцності матрицею, внаслідок чого вона вже не може виконувати свої фактичні функції. Таким чином, отримані результати показують, що завдяки врахуванню розглянутих особливостей сприйняття навантаження композитами досліджуваного типу вдається отримати наблизені до реальності розрахункові параметри ударної взаємодії.

#### 4. Висновки

У проведеному дослідженні вивчається боковий прямий удар високошвидкісного кулевидного тіла із напівсферичною носовою частиною із защемленою по краю нерухомою композиційною пластиною у вигляді багат шарового ламінату. Встановлені закономірності поведінки гнучкого еластичного армованого волоконними сітками композиту при ударі, які полягають у характері зміни енергопоглинання матеріалу в залежності від початкової енергії удару.

Спостерігається зростання як поглиненої матеріалом пластини енергії, так і залишкової енергії ударника. Енергопоглинання викликане перерозподілом енергії ударника у процесі взаємодії із пластиною і її перетворенням у механічну енергію коливань та розсіюванням при утворенні пошкоджень пластини та вважається рівним 100 % нижче балістичного ліміту композиту і падає зі зростанням швидкості удару до 8 % у досліджуваному діапазоні швидкостей до 600 м/с.

Виділені основні механізми пошкодження композитів розглянутого типу, зокрема, характерне для них продавлювання матриці волокнами, та особливості перерозподілу навантаження завдяки взаємодії систем армуючих волокон і еластичності.

Для розрахунку еластичних армованих сітками композитів розроблена адаптована ймовірнісна модель матеріалу. Відповідний алгоритм розрахунків імплементований у вигляді підпрограми в рамках програмного комплексу для чисельного розрахунку методом скінченних елементів. Застосування розробленої моделі дозволяє зменшити похибку розрахунку енергопоглинання композиту з 18 % до 13 % відносно експериментальних даних при максимальній дослідженій швидкості удару.

#### Література

- [1] Tan V.B.C. Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry / V.B.C. Tan, K.J.L. Khoo // *International Journal of Impact Engineering*. – 2005. – vol. 31. – № 7. – p. 793-810.
- [2] Christoforou A.P. Characterization of impact in composite plates / A.P. Christoforou, A.S. Yigit // *Compos. Struct.* – 1998. – № 43. – p. 15-24.
- [3] Пат. 91030 Україна. Волоконнозміцнений композиційний матеріал із вузловим сітчастим армуванням / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель; заяв. і патентовласн. НАУ. – заявл. 25.06.2014; опубл. 16.10.2013, Бюл. 12.
- [4] Пат. 91012 Україна. Гнучкий еластичний волоконнозміцнений удароміцний матеріал / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель, А.О. Олефір; заяв. і патентовласн. НАУ. – заявл. 25.06.2014; опубл. 19.07.2013, Бюл. 12.
- [5] Пат. 91056 Україна. Волоконнозміцнений композиційний матеріал із тривимірним петльовим армуванням / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель, А.О. Олефір; заяв. і патентовласн. НАУ. – заявл. 25.06.2014; опубл. 13.11.2013, Бюл. 12.
- [6] Астанін В.В. Особливості поведінки пружних композитних зразків при ударному навантаженні / В.В. Астанін, О.І. Олефір, Г.О. Щегель, А.О. Олефір // *Технологические системы*. – 2013. – № 4(65). – с. 33-38.
- [7] Словник української мови: в 11 томах / Т. 2: 1971. – 466 с.
- [8] Hufenbach W. Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications / W. Hufenbach, R. Віһм, M. Thieme // *Materials & Design*. – 2011. – vol. 32. – № 3. – p. 1468-1476.
- [9] Altenbach H. Modern trends in composite laminates mechanics / H. Altenbach, W. Becker. – N.Y.: Springer. Science & Business Media, 2003. – 294 p.
- [10] Dobyns A.L. Analysis of simply-supported orthotropic plates subject to static and dynamic loads / A.L. Dobyns // *AIAA J.* – 1981. – vol. 19. – № 5. – p. 642-650.
- [11] Handbook of dynamic system modeling / P.A. Fishwick, ed. – NY: CRC Press, 2007. – 760 p.
- [12] Reddy J.N. Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. 2nd Ed. / J. N. Reddy. – CRC Press, 2004. – 856 p.
- [13] Lim G.T. On canonical bending relationships for plates / G.T. Lim, J.N. Reddy // *Int.J. Solids and Struct.* – 2003. – vol. 40. – p. 3039-3067.
- [14] Simulia Abaqus Analysis. User Documentation / Simulia. – Providence: Dassault Systems, 2007. – 651 p.
- [15] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites / Z. Hashin // *J. Appl. Mech.* – 1980. – vol. 47. – p. 329-334.
- [16] 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.



- [17] Simulia Abaqus User Subroutines Reference Manual / Simulia. – Providence: Dassault Systems, 2012. – 591 p.
- [18] Астанін В.В. Моделювання ударної взаємодії багатокомпонентних композитів при високих швидкостях / В.В. Астанін, Г.О. Щегель // Технологические системы. – 2013. – № 2(63). – с. 39-43.
- [19] 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. Вұһm, A. Hornig // Int. J. Impact Engineer. – 2014. – vol. 69. – p. 1-10.
- [20] 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 // Int. J. Impact Eng. – 2012. – vol. 49. – p. 22-30.
- [21] Tan V.B.C. Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading / V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, T.E. Tay // Int. J. Solids and Struct. – 2003. – № 40. – p. 6245-6266.
- [22] Gama B.A. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites / B.A. Gama, J.W. Gillespie // Int. J. Imp. Eng. – 2011. – № 38. – p. 181-197.
- [23] Lin L.C. Ballistic energy absorption of composites / L.C. Lin, A. Bhatnagar, H.W. Chang // 22nd International SAMPE Technical Conference : 1990. – p. 1-13.
- [24] 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.

*Astanin V.V., Olefir O.I., Shchegel G.O., Olefir A.O.*  
National Aviation University. Ukraine, Kyiv

#### NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-SPEED IMPACT OF NET-REINFORCED FLEXIBLE COMPOSITES

*An adapted for flexible net-reinforced composites probabilistic material model of deformation and fracture for the numerical simulation of high-speed impact with FEM is developed. Modeling methodology and features are considered in details. Comparison of absorbed energy simulation results and experimental data shows the feasibility of the proposed model.*

*Keywords:* flexible elastic composites; impact strength; FEM; net reinforcement; energy absorption; matrix punching shear by fibers

#### References

- [1] Tan V.B.C. Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry / V.B.C. Tan, K.J.L. Khoo // International Journal of Impact Engineering. – 2005. – vol. 31. – № 7. – p. 793-810.
- [2] Christoforou A.P. Characterization of impact in composite plates / A.P. Christoforou, A.S. Yigit // Compos. Struct. – 1998. – № 43. – p. 15-24.
- [3] Patent 91030 Ukraine. Fiber reinforced composite material with nodular net reinforcement / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir; patentee and patent holder NAU. – applied 25.06.2014; publ. 16.10.2013, Bulletin 12.
- [4] Patent 91012 Ukraine. Flexible elastic fiber reinforced impact-resistant material / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir; patentee and patent holder NAU. – applied 25.06.2014; publ. 19.07.2013, Bulletin 12.
- [5] Patent 91056 Ukraine. Fiber reinforced composite material with three-dimensional stitch reinforcement / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir; patentee and patent holder NAU. – applied 25.06.2014; publ. 13.11.2013, Bulletin 12.
- [6] Astanin V.V. Features of elastic flexible composite specimens behavior under impact loading / V.V. Astanin, O.I. Olefir, G.O. Shchegel, A.O. Olefir // Technological systems. – 2013. – № 4(65). – p. 33-38.
- [7] Dictionary of Ukrainian language: in 11 volumes / V. 2: 1971. – 466 P.
- [8] Hufenbach W. Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications / W. Hufenbach, R. Вұһm, M. Thieme // Materials & Design. – 2011. – vol. 32. – № 3. – p. 1468-1476.
- [9] Altenbach H. Modern trends in composite laminates mechanics / H. Altenbach, W. Becker. – N.Y.: Springer. Science & Business Media, 2003. – 294 p.





- [10] Dobyns A.L. Analysis of simply-supported orthotropic plates subject to static and dynamic loads / A.L. Dobyns // AIAA J. – 1981. – vol. 19. – № 5. – p. 642-650.
- [11] Handbook of dynamic system modeling / P.A. Fishwick, ed. – NY: CRC Press, 2007. – 760 p.
- [12] Reddy J.N. Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. 2nd Ed. / J. N. Reddy. – CRC Press, 2004. – 856 p.
- [13] Lim G.T. On canonical bending relationships for plates / G.T. Lim, J.N. Reddy // Int.J. Solids and Struct. – 2003. – vol. 40. – p. 3039-3067.
- [14] Simulia Abaqus Analysis. User Documentation / Simulia. – Providence: Dassault Systems, 2007. – 651 p.
- [15] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites / Z. Hashin // J. Appl. Mech. – 1980. – vol. 47. – p. 329-334.
- [16] 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.
- [17] Simulia Abaqus User Subroutines Reference Manual / Simulia. – Providence: Dassault Systems, 2012. – 591 p.
- [18] Astanin V.V. Modeling the impact interaction of multicomponent composites at high velocities / V.V. Astanin, G.O. Shchegel // Technological systems. – 2013. – № 2(63). – p. 39-43.
- [19] 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. Břhm, A. Hornig // Int. J. Impact Engineer. – 2014. – vol. 69. – p. 1-10.
- [20] 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 // Int. J. Impact Eng. – 2012. – vol. 49. – p. 22-30.
- [21] Tan V.B.C. Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading / V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, T.E. Tay // Int. J. Solids and Struct. – 2003. – № 40. – p. 6245-6266.
- [22] Gama B.A. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites / B.A. Gama, J.W. Gillespie // Int. J. Imp. Eng. – 2011. – № 38. – p. 181-197.
- [23] Lin L.C. Ballistic energy absorption of composites / L.C. Lin, A. Bhatnagar, H.W. Chang // 22nd International SAMPE Technical Conference : 1990. – p. 1-13.
- [24] Shchegel G.O. Deformation and fracture of plates made of composite materials under impact loading / G.O. Shchegel // PhD Dissertation abstr.: 01.02.04. – 2013. – 20 P.

УДК 629.7.017

**Головченко Я.О.**

Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

### ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНОГО УДАРУ АРМОВАНИХ СІТКАМИ ПРУЖНИХ КОМПОЗИТИВ

*Проведен анализ причин повреждения агрегатов самолета при эксплуатации на грунтовых взлетно-посадочных полосах. Рассмотрен процесс повреждения обшивки от соударения с летящими частицами грунта. Проведен анализ возможных методов защиты конструкции самолета от повреждений. Спланирован и проведен эксперимент для проверки возможности применения полиуретановых пленок в качестве защитного покрытия.*

*Ключевые слова:* самолет; удар; частица грунта; защитное покрытие

При эксплуатации самолетов на неподготовленных аэродромах возможны повреждения нижней поверхности фюзеляжа, передних кромок крыла, оперения и т.п. разнообразными по форме, массе и твердости частицами грунта (рис. 1).

В результате соударений наблюдаются следующие последствия:

- аэроабразивный износ пылевидными частицами носовых кромок агрегатов самолета (крыла, оперения, фюзеляжа, воздушного винта и т.п.);