

УДК 620.178.7:620.179:678.7

DOI: 10.18372/0370-2197.2(111).21336

Є. В. ПЕДАН

*Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна*

## ГЕОМЕТРИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА НИЗЬКОШВИДКІСНИХ УДАРНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ЛАМІНАТІВ: ОГЛЯД МЕТОДІВ

Вуглепластикові ламінати широко застосовуються у легких несучих конструкціях, однак оцінювання їхнього технічного стану після низькошвидкісного удару залишається методично складною задачею. Основна причина полягає у можливому формуванні значного внутрішнього пошкодження за мінімальної або слабо вираженої зовнішньої ознаки. Такий тип дефектності в літературі розглядається як ледь помітне ударне пошкодження (*Barely Visible Impact Damage, BVID*). Мета статті полягає у систематизації методів опису залишкової поверхневої геометрії та в аналізі її діагностичної інформативності щодо внутрішньої деламінації й інших пошкоджень CFRP-ламінату. Розглянуто максимальну глибину вм'ятини, площу й еквівалентний діаметр поверхневої зони пошкодження, об'єм вм'ятини, форму профілю, кривизну поверхні та часову релаксацію залишкової вм'ятини після удару. Проаналізовано контактні методи вимірювання, оптичну профілометрію, тривимірне сканування, цифрову кореляцію зображень, автоматизоване візуальне виявлення та комбіновані схеми неруйнівного контролю. Показано, що поверхнева геометрія є допоміжною діагностичною характеристикою, але не еквівалентом повної карти внутрішньої деламінації та тріщиноутворення. Для обґрунтованої інтерпретації геометричних параметрів необхідно враховувати товщину ламінату, схему армування, геометрію індентора, енергію удару, час після удару, умови експлуатації та результати NDE-верифікації. Визначено обмеження поверхнево-орієнтованого оцінювання та перспективи інтеграції 3D-профілювання, неруйнівного контролю й машинного навчання для прогнозування внутрішнього пошкодження та залишкової несучої здатності.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, вуглепластиковий композит, низькошвидкісний удар, ледь помітне ударне пошкодження (*BVID*), глибина вм'ятини, оптична профілометрія, 3D-сканування, деламінація, розширення, неруйнівний контроль.

**Вступ.** Вуглепластикові композиційні матеріали (*carbon fibre reinforced polymer, CFRP*) застосовуються в авіаційних, автомобільних, енергетичних, морських та інших високонантажених конструкціях завдяки високій питомій жорсткості, питомій міцності, корозійній стійкості та можливості керованого формування анізотропних властивостей через схему армування. Водночас ламіновані полімерматричні композити є чутливими до навантажень поза площиною, зокрема до низькошвидкісного удару. Навіть ударна дія з відносно невеликою енергією може спричинити тріщини матриці, міжшарову деламінацію, руйнування волокон, порушення адгезії на межі волокно-матриця та локальну залишкову вм'ятину. На відміну від металевих конструкцій, поверхнева ознака удару в CFRP може бути малорозмірною, тоді як внутрішня зона дефектності зберігає конструкційну значущість [1, 2].

Низькошвидкісний удар (*low-velocity impact, LVI*) реалізується за умов, коли тривалість контакту достатня для формування значної реакції зразка або елемента конструкції. Граничне значення швидкості для віднесення події до LVI залежить

від жорсткості ламінату, маси ударної системи, граничних умов, геометрії індентора та матеріальної системи. Саме LVI є типовим механізмом формування пошкоджень, які не завжди надійно ідентифікуються стандартним візуальним оглядом [2]. У таких випадках поверхнева ознака може залишатися ледь помітною, тоді як внутрішня область руйнування має істотну площу або об'єм. BVID доцільно трактувати як експлуатаційно-інспекційне поняття, пов'язане з порогом надійного візуального виявлення для конкретної процедури огляду; числові межі видимості залежать від матеріальної системи, стану поверхні, умов освітлення, товщини ламінату та сертифікаційних вимог [3, 4]. Така невідповідність між зовнішньою ознакою та внутрішнім станом зумовлює інспекційну критичність BVID для композитних конструкцій. Методи неруйнівного контролю при цьому характеризуються різними співвідношеннями чутливості, просторової роздільної здатності, продуктивності, вартості, польової придатності та здатності класифікувати типи пошкоджень [5].

У цій задачі залишкова поверхнева геометрія є первинним діагностичним рівнем. Глибина вм'ятини, площа поверхневої зони пошкодження, кривизна, форма профілю та об'єм локальної западини можуть бути визначені швидше, ніж повна внутрішня карта деламінації. Проте поверхнева вм'ятини не є прямим еквівалентом внутрішньої дефектної структури. Невелика залишкова деформація може відповідати значній площі деламінації, а близькі значення глибини вм'ятини можуть формуватися за різних механізмів внутрішнього руйнування. У сучасних дослідженнях цей зв'язок формалізують через кореляцію глибини вм'ятини з площею деламінації [6], прогнозування внутрішнього пошкодження за поверхневим профілем із використанням машинного навчання [4] та аналіз часової релаксації вм'ятини після удару [7, 8].

Метою статті є систематизація підходів до геометричних характеристик LVI-пошкоджень у CFRP-ламінатах з акцентом на інтерпретацію поверхневого профілю як потенційного, але неповного предиктора внутрішнього пошкодження. Предметом аналізу є геометричні характеристики, методи їх вимірювання, зв'язок між поверхневою геометрією та внутрішніми пошкодженнями, часові ефекти, стандартний інженерний підхід, обмеження методу та напрями подальшого розвитку.

**Стандартний інженерний підхід.** Для лабораторного відтворення ударних пошкоджень у композитних пластинах геометричні вимірювання доцільно безпосередньо пов'язувати зі стандартизованими схемами випробувань. ASTM D7136/D7136M-25 визначає метод оцінювання стійкості багатонапрямлених полімерматричних композитних ламінованих пластин до удару падаючим вантажем [9]. Тому при описі геометричних характеристик необхідно фіксувати не лише глибину або площу вм'ятини, а й енергію удару, масу та геометрію індентора, граничні умови закріплення, розміри зразка та час між ударом і вимірюванням.

ASTM D7137/D7137M-23 регламентує визначення залишкової міцності на стиск пошкоджених багатонапрямлених полімерматричних композитних пластин після квазістатичного втиснення або удару за ASTM D7136/D7136M [10]. Отже, геометрія вм'ятини має інженерну цінність не як ізольований вимірювальний результат, а як потенційна вхідна ознака для оцінювання внутрішнього пошкодження й прогнозування залишкової несучої здатності, зокрема

характеристики залишкової міцності на стиск після удару (compression after impact, CAI).

**Формування ударних пошкоджень у CFRP-ламінатах.** Реакція CFRP-ламінату на низькошвидкісний удар визначається контактною механікою, згином пластини або оболонки, міжшаровими напруженнями, орієнтацією шарів, міжшаровою тріщиностійкістю та граничними умовами. Частина кінетичної енергії під час удару накопичується пружно, а частина дисипується через незворотні механізми пошкодження. Основні механізми включають тріщиноутворення у матриці, міжшарову деламінацію, руйнування волокон, локальне зминання та формування залишкової поверхневої вм'ятини [11].

Зовнішній прояв удару реєструється як залишкова вм'ятинка або локальна зміна топографії. Його формування зумовлене постійною деформацією матриці, локальним зминанням, пошкодженням волокон і частковим пружним або в'язкопружним відновленням поверхні після розвантаження. Деламінація може поширюватися за межі видимої або геометрично сегментованої вм'ятини, а її форма значною мірою визначається орієнтацією шарів і послідовністю укладання. Тому поверхневу геометрію слід розглядати як вимірюваний індикатор дефектності, але не як повну оцінку внутрішнього пошкодження [6, 7].

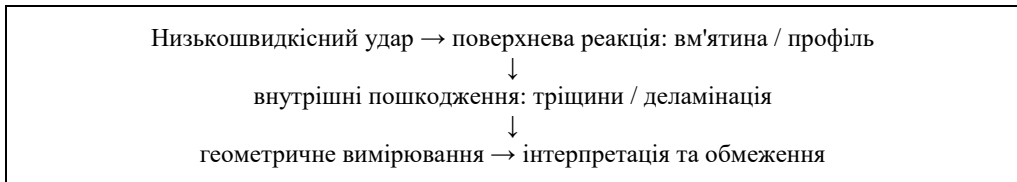


Рис. 1. Узагальнений зв'язок між ударним навантаженням, залишковою поверхневою геометрією, внутрішніми пошкодженнями та їх інтерпретацією.

**Геометричні параметри для опису пошкодження.** Максимальна глибина вм'ятини є базовим і найпоширенішим геометричним параметром ударного пошкодження. Її визначають як найбільше залишкове зміщення поверхні у напрямку поза площиною відносно непошкодженої або апроксимованої опорної поверхні. Цей параметр може бути отриманий контактними індикаторами, координатно-вимірювальними системами, оптичною профілометрією, лазерним або структурно-світловим скануванням. Перевага параметра полягає у простоті вимірювання та придатності для порогового контролю. Водночас глибина вм'ятини є чутливою до вибору опорної поверхні, просторового шуму, фільтрації даних, часу після удару та часткового відновлення матеріалу [6].

Площа, діаметр та еквівалентний діаметр поверхневої зони застосовують тоді, коли вм'ятину можна сегментувати на зображенні або реконструйованій карті висот. За наближено кругової форми зони пошкодження обчислюють еквівалентний діаметр. Реальні поверхневі сліди зазвичай є еліптичними, асиметричними або локально нерегулярними; тому площинні метрики мають супроводжуватися визначеним критерієм сегментації: порогом висоти, порогом кривизни, порогом інтенсивності або вручну заданою межею. Використання лише діаметра може давати хибну інтерпретацію, оскільки вм'ятини з подібним поперечним розміром можуть істотно відрізнятися за глибиною, об'ємом і кривизною [6, 4].

Об'єм вм'ятини є інтегральним тривимірним параметром, який узагальнює відхилення поверхні в межах вибраної зони пошкодження. Математично його можна описати як:

$$V_d = \iint_{A_d} [z_0(x,y) - z(x,y)] dx dy,$$

де  $A_d$  - площа пошкодження,  $z_0(x,y)$  - опорна поверхня,  $z(x,y)$  - виміряна поверхня після удару. Надійність такого параметра залежить від способу побудови опорної поверхні, просторової роздільної здатності вимірювання та алгоритму визначення межі пошкодження. Форма профілю містить додаткову інформацію про просторовий розподіл деформації. На відміну від одного скалярного параметра, повний профіль може відображати форму індентора, контактну область і локальну жорсткість ламінату, що робить його перспективним для машинного прогнозування внутрішнього пошкодження [4].

Кривизна і градієнт поверхні є похідними характеристиками повного профілю, які описують локальні переходи й різкі геометричні зміни, що не завжди фіксуються максимальною глибиною. Ці параметри можуть використовуватися для уточнення межі вм'ятини або виявлення локалізованих зон зміни топографії. Їх застосування потребує окремої валідації для конкретної методики вимірювання, оскільки похідні характеристики є чутливими до шуму, алгоритму згладжування та масштабу обчислення похідної [4].

Таблиця 1

### Основні геометричні характеристики ударних поверхневих пошкоджень у CFRP-ламінатах

Характеристика	Що характеризує	Основне обмеження
Максимальна глибина вм'ятини	Найбільше залишкове зміщення поверхні відносно опорної поверхні	Чутливість до rebound-ефекту, вибору базової поверхні та шуму
Площа / еквівалентний діаметр	Поперечний розмір видимої або порогово виділеної зони	Потребує правила сегментації; не завжди відповідає площі деламінації
Об'єм вм'ятини	Інтегральна тривимірна западина поверхні	Залежить від межі пошкодження та реконструкції опорної поверхні
Форма профілю	Просторовий розподіл вм'ятини, асиметрія та локальні градієнти	Потребує щільних даних і надійної попередньої обробки
Кривизна та градієнт	Локальні переходи на поверхні, різкі геометричні зміни	Чутливість до шуму та способу згладжування

**Методи вимірювання геометрії поверхні.** Для визначення описаних геометричних параметрів використовують контактні й безконтактні методи. Підходи відрізняються за просторовою та вертикальною роздільною здатністю, продуктивністю, чутливістю до властивостей поверхні, складністю калібрування та придатністю до польового застосування. Приклади використання таких методів наведено у роботах Brooks et al. для глибиноміра та конфокальної мікроскопії, Ding et al. для WLI/C-scan/SEM, Flores et al. для високошвидкісної 3D-DIC, Hasebe et al. для поверхневих профілів і машинного навчання, а Tabatabaeian et al. - для автоматизованого візуального виявлення BVID [6, 12, 13, 4, 14]. Вибір методу визначається доступною апаратурою, розміром зони пошкодження, складністю топографії та вимогами до верифікації внутрішнього стану.

Таблиця 2

**Порівняння підходів до вимірювання геометрії поверхневих пошкоджень**

Метод	Типовий результат	Переваги	Обмеження
Глибиномір / контактний щуп	Одноточкова глибина	Простота, низька вартість, трасованість вимірювання	Мала просторовість; залежність від оператора; контакт із поверхнею
Координатне або стилусне сканування	Точка або лінійний профіль	Точний профіль уздовж вибраної траєкторії	Повільність для великих площ; ризик пропуску асиметричних ознак
Оптична профілометрія	Карта висот високої роздільності	Безконтактність; детальна топографія; можливість визначення глибини й об'єму	Обмежене поле зору; чутливість до оптичних властивостей матеріалу
3D-лазерне / структурно-світлове сканування	Хмара точок або полігональна сітка	Придатність для більших площ; швидке безконтактне отримання даних	Нижча вертикальна роздільність; потреба у калібруванні та вирівнюванні
Цифрова кореляція зображень (DIC)	Поля переміщень / деформацій	Рєєстрація еволюції деформацій; інформативність під час навантаження	Потреба у спековому покритті та ретельному калібруванні; не завжди дає пряму залишкову топографію
Глибоке навчання за зображеннями	Ймовірність / локалізація пошкодження	Автоматизація візуального виявлення BVID	Може не давати фізичних геометричних параметрів без 3D-даних

**Роль NDE-верифікації.** Поверхнева геометрія забезпечує швидкий опис зовнішньої морфології пошкодження, проте не повинна розглядатися як заміна внутрішнього неруйнівного контролю. Для BVID принципово є невідповідність між слабко вираженою поверхневою ознакою та потенційно значною областю деламінації, тріщин матриці або пошкодження волокон усередині ламінату [6, 5]. Тому коректна схема оцінювання має бути дворівневою: поверхневі характеристики використовуються для швидкого скринінгу, документування та формування вхідних ознак для прогностичних моделей, а ультразвуковий контроль, рентгенівська томографія, термографія, shearography, optical computed tomography та інші NDE-методи - для верифікації внутрішньої картини пошкодження [5].

**Зв'язок між поверхневою геометрією та внутрішніми пошкодженнями.** Ключова методична проблема полягає у визначенні того, чи може поверхнева геометрія бути надійним індикатором внутрішнього пошкодження. Відповідь є умовною: поверхнева геометрія містить діагностично значущу інформацію, однак відображення «вм'ятина - внутрішня деламінація» не є однозначним і універсальним. Однакова енергія удару може формувати різні внутрішні конфігурації дефектності залежно від товщини ламінату, схеми укладання, радіуса або форми індентора, граничних умов і матеріальної системи [6, 4, 12, 7]. У загальному вигляді цей зв'язок можна подати як

$$D_{\text{internal}} = f(d_{\text{max}}, A_d, V_d, \kappa, \nabla z, t_{\text{after}}, h, R_i, E_i, L, M),$$

де  $D_{\text{internal}}$  - параметр внутрішнього пошкодження;  $d_{\text{max}}$  - максимальна глибина вм'ятини;  $A_d$  - площа поверхневої зони;  $V_d$  - об'єм вм'ятини;  $\kappa$  - кривизна поверхні;  $\nabla z$  - градієнтні ознаки профілю;  $t_{\text{after}}$  - час після удару;  $h$  -

товщина ламінату;  $R_i$  - геометрія індентора;  $E_i$  - енергія удару;  $L$  - схема укладання шарів;  $M$  - матеріальна система та стан середовища. Наведений запис підкреслює, що поверхнева геометрія є лише частиною багатofакторної задачі інтерпретації пошкодження.

З цього випливає робоча гіпотеза: максимальна глибина вм'ятини як ізольований параметр є недостатнім предиктором внутрішньої деламінації, тоді як комбінація глибини, площі, об'єму, кривизни, градієнтів поверхні, товщини ламінату, енергії удару, геометрії індентора та часу після удару може підвищити точність оцінювання внутрішнього пошкодження. Така постановка узгоджується з експериментальними дослідженнями зв'язку indentation-delamination, роботами з прогнозування внутрішнього пошкодження за поверхневими профілями та результатами щодо часової релаксації вм'ятини [6, 4, 7, 8].

**Часове відновлення та вплив індентора й умов експерименту.** Одним із визначальних чинників оцінювання за вм'ятиною є часове відновлення поверхні після удару. Ударно-індукована вм'ятина може частково зменшуватися після розвантаження через пружне відновлення, в'язкопружну поведінку полімерної матриці та вплив середовища. Отже, глибина, виміряна одразу після удару, може відрізнятись від величини, зафіксованої через години або дні. Yousaf і Zhou показали, що глибину вм'ятини потрібно розглядати як часово залежний параметр [7, 8]. Для коректного порівняння результатів необхідно вказувати інтервал між ударом і вимірюванням та контролювати температуру й вологість.

На геометричні параметри істотно впливають форма індентора та граничні умови випробування. Сферичний або заокруглений індентор і плоско-торцевий індентор можуть формувати різні співвідношення локального зминання, згину, тріщиноутворення в матриці, руйнування волокон і деламінації. Додатковими визначальними чинниками є товщина ламінату, схема армування і міжшарова тріщиностійкість матеріальної системи. Тому порогові значення глибини вм'ятини не слід подавати як універсальні; коректним є використання нормалізованих параметрів та їх інтерпретація в межах конкретної архітектури ламінату й схеми випробувань [12].

**Обмеження поверхневої геометричної характеристики.** Поверхнево-орієнтоване оцінювання має такі основні обмеження:

- неоднозначність відображення: різні внутрішні стани пошкодження можуть давати подібні поверхневі профілі;
- прихована деламінація: деламінація може виходити за межі видимої або геометрично сегментованої поверхневої зони;
- часова залежність: rebound-ефект і в'язкопружне відновлення змінюють глибину вм'ятини після удару;
- вплив середовища: температура й вологість змінюють відновлення поверхні та механічну відповідь матеріалу;
- залежність від обробки даних: глибина, площа й об'єм залежать від опорної поверхні, роздільної здатності, фільтрації та сегментації;
- стан поверхні: фарбування, покриття, глянець, текстура волокон і забруднення можуть впливати на оптичні вимірювання.

Ці обмеження визначають область застосовності геометричних параметрів і узгоджуються з даними про неоднозначний зв'язок між вм'ятиною та деламінацією, часове відновлення вм'ятини, вплив середовища та необхідність комбінування поверхневих методів із NDE [6, 7, 8, 5]. Поверхнева геометрія придатна для швидкого скринінгу, документування морфології, лабораторних кореляційних досліджень і побудови входних ознак для прогностичних моделей. Водночас вона не повинна замінювати внутрішній неруйнівний контроль у випадках, коли потрібно підтвердити конструкційну придатність.

**Перспективні напрями досліджень.** Перспективним напрямом є формування стандартизованих наборів даних, які одночасно містять поверхневі профілі, умови удару, властивості ламінату, карти внутрішніх пошкоджень, отримані методами неруйнівного контролю, та результати випробувань на залишкову міцність. Для задачі прогнозування такої набір даних доцільно подавати у вигляді відображення

$$\{d_{max}, A_d, V_d, \kappa, \sqrt{z}, E_i, h, R_i, t_{after}\} \rightarrow \{A_{delam}, V_{delam}, \sigma_{CAI}\},$$

де  $A_{delam}$  і  $V_{delam}$  - площа та об'єм внутрішньої деламінації, а  $\sigma_{CAI}$  - залишкова міцність на стиск після удару. Роботи Hasebe та співавторів демонструють потенціал профільних даних для машинного прогнозування внутрішнього пошкодження та CAI-характеристик, однак для оцінки узагальнюваності потрібні ширші й відкриті набори даних [4, 15].

Другим напрямом є мультимодальна інспекція, яка поєднує поверхневі характеристики з ультразвуковими, термографічними, томографічними та іншими NDE-методами, а також з автоматизованим аналізом зображень [5, 14]. Третім напрямом є підвищення відтворюваності геометричних характеристик: необхідно стандартизувати побудову опорних поверхонь, фільтрацію та сегментацію, а також обов'язково вказувати час після удару й умови середовища. Окремо слід розмежовувати задачі виявлення, локалізації, оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу. Поверхнева геометрія найбільш інформативна для перших двох задач, тоді як прогнозування внутрішнього пошкодження та залишкової міцності потребує NDE-верифікації, моделювання й експериментальної валідації.

### **Висновки:**

1. Геометрична характеристика є необхідним елементом оцінювання низькошвидкісних ударних пошкоджень у CFRP-ламінатах, однак має розглядатися не як автономна процедура вимірювання вм'ятини, а як складова багатofакторної задачі інтерпретації внутрішнього пошкодження.

2. Максимальна глибина вм'ятини, площа поверхневої зони, об'єм вм'ятини, форма профілю, кривизна та градієнти поверхні забезпечують формалізований опис зовнішнього стану пошкодження. Найбільш інформативними для повного геометричного опису є оптична профілометрія та 3D-сканування, оскільки вони формують безконтактні карти поверхні та дають змогу вилучати декілька параметрів одночасно.

3. BVID є передусім інспекційною проблемою, зумовленою невідповідністю між малою поверхневою ознакою та потенційно значною внутрішньою

деламинацією. Глибина вм'ятини залежить від товщини ламінату, схеми армування, геометрії індентора, енергії удару, граничних умов, матеріальної системи, часу після удару та умов середовища. Найбільш перспективним напрямом є інтеграція 3D-профілювання, NDE-верифікації та машинного навчання для прогнозування внутрішнього пошкодження й залишкової міцності після удару.

### Список літератури

1. Richardson M. O. W., Wisheart M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996. Vol. 27, Is. 12. P. 1123-1131. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7).
2. Davies G. A. O., Olsson R. Impact on composite structures. *The Aeronautical Journal*. 2004. Vol. 108, Is. 1089. P. 541-563. <https://doi.org/10.1017/S000192400000385>.
3. European Union Aviation Safety Agency. *AMC 20-29: Composite Aircraft Structure*. EASA, 2021.
4. Hasebe S., Higuchi R., Yokozeki T., Takeda S.-i. Internal low-velocity impact damage prediction in CFRP laminates using surface profiles and machine learning. *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 237. 109844. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109844>.
5. Janeliukstis R., Baranovskis D., Katunin A., Zorin I., Burgholzer P., Lopes H., Dragan K., Rucevskis S., Gaile L., Chen X. Nondestructive evaluation of barely visible impact damage in composite structures - a review. *Composite Structures*. 2025. Vol. 373. 119661. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119661>.
6. Brooks R. A., Liu J., Hall Z. E. C., Joesbury A. M., Harper L. T., Liu H., Kinloch A. J., Dear J. P. The relationship between the extent of indentation and impact damage in carbon-fibre reinforced-plastic composites after a low-velocity impact. *Applied Composite Materials*. 2024. Vol. 31. P. 1869-1888. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10223-2>.
7. Yousaf M., Zhou C. Numerical study on the rebound of low-velocity impact-induced indentation in composite laminate. *Aerospace*. 2022. Vol. 9, Is. 11. 651. <https://doi.org/10.3390/aerospace9110651>.
8. Yousaf M., Zhou C., Yang Y., Wang L. Numerical study of the hygrothermal effects on low velocity impact-induced indentation and its rebound in composite laminate. *Aerospace*. 2022. Vol. 9, Is. 12. 802. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120802>.
9. ASTM International. ASTM D7136/D7136M-25: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025.
10. ASTM International. ASTM D7137/D7137M-23: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
11. Cantwell W. J., Morton J. The impact resistance of composite materials - a review. *Composites*. 1991. Vol. 22, Is. 5. P. 347-362. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90549-V](https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-V).
12. Ding Y., Johnson M. S., Liu J., Dear J., Li J., Liu H., Kinloch A. J., Dear J. P. Drop-weight impact of composite laminates: modelling the effect of a round-nosed versus a flat-ended impactor. *Applied Composite Materials*. 2025. Vol. 32, Is. 3. P. 791-814. <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10315-7>.

---

13. Flores M., Mollenhauer D., Runatunga V., Beberniss T., Rapping D., Pankow M. High-speed 3D digital image correlation of low-velocity impacts on composite plates. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 131. P. 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.078>.

14. Tabatabaeian A., Jerkovic B., Harrison P., Marchiori E., Fotouhi M. Barely visible impact damage detection in composite structures using deep learning networks with varying complexities. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 264. 110907. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110907>.

15. Hasebe S., Higuchi R., Yokozeki T., Takeda S. Prediction of compression after impact strength from surface profile of low-velocity impact damaged CFRP laminates using machine learning. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. Vol. 189. 108560. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108560>.

Отримано: 19 травня 2026

Прийнято: 25 травня 2026

Опубліковано: 31 травня 2026

**Педан Євген** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 5706199@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.

Ye. V. PEDAN

## GEOMETRIC CHARACTERIZATION OF LOW-VELOCITY IMPACT DAMAGE IN CARBON-FIBRE-REINFORCED POLYMER LAMINATES: A REVIEW OF METHODS

This review considers methods for describing residual surface geometry after low-velocity impact in carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) laminates. The main focus is the diagnostic relationship between surface parameters and internal damage, especially delamination associated with barely visible impact damage (BVID). The analysed parameters include maximum indentation depth, damaged-area size, equivalent diameter, indentation volume, profile shape, surface curvature and time-dependent indentation recovery. Contact measurements, optical profilometry, three-dimensional scanning, digital image correlation, automated visual detection and hybrid nondestructive evaluation schemes are compared. The review shows that surface geometry is a useful diagnostic characteristic but cannot be interpreted as a complete representation of internal damage. Reliable assessment requires accounting for laminate thickness, stacking sequence, impactor geometry, impact energy, boundary conditions, time after impact, environmental factors and NDE verification. The most promising direction is the integration of 3D surface profiling, nondestructive evaluation and machine-learning models for predicting internal damage and residual compression-after-impact strength.

**Keywords:** composite material, carbon-fibre-reinforced polymer composite, low-velocity impact, barely visible impact damage (BVID), indentation depth, optical profilometry, 3D scanning, delamination, nondestructive evaluation.

### References

1. Richardson M. O. W., Wisheart M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996. Vol. 27, Is. 12. P. 1123-1131. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7).
2. Davies G. A. O., Olsson R. Impact on composite structures. *The Aeronautical Journal*. 2004. Vol. 108, Is. 1089. P. 541-563. <https://doi.org/10.1017/S0001924000000385>.
3. European Union Aviation Safety Agency. *AMC 20-29: Composite Aircraft Structure*. EASA, 2021.
4. Hasebe S., Higuchi R., Yokozeki T., Takeda S.-i. Internal low-velocity impact damage prediction in CFRP laminates using surface profiles and machine learning. *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 237. 109844. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109844>.
5. Janeliukstis R., Baranovskis D., Katunin A., Zorin I., Burgholzer P., Lopes H., Dragan K., Rucevskis S., Gaile L., Chen X. Nondestructive evaluation of barely visible impact damage in composite structures - a review. *Composite Structures*. 2025. Vol. 373. 119661. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119661>.
6. Brooks R. A., Liu J., Hall Z. E. C., Joesbury A. M., Harper L. T., Liu H., Kinloch A. J., Dear J. P. The relationship between the extent of indentation and impact damage in carbon-fibre reinforced-plastic composites after a low-velocity impact. *Applied Composite Materials*. 2024. Vol. 31. P. 1869-1888. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10223-2>.
7. Yousaf M., Zhou C. Numerical study on the rebound of low-velocity impact-induced indentation in composite laminate. *Aerospace*. 2022. Vol. 9, Is. 11. 651. <https://doi.org/10.3390/aerospace9110651>.
8. Yousaf M., Zhou C., Yang Y., Wang L. Numerical study of the hygrothermal effects on low velocity impact-induced indentation and its rebound in composite laminate. *Aerospace*. 2022. Vol. 9, Is. 12. 802. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120802>.

- 
9. ASTM International. ASTM D7136/D7136M-25: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025.
  10. ASTM International. ASTM D7137/D7137M-23: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
  11. Cantwell W. J., Morton J. The impact resistance of composite materials - a review. *Composites*. 1991. Vol. 22, Is. 5. P. 347-362. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90549-V](https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-V).
  12. Ding Y., Johnson M. S., Liu J., Dear J., Li J., Liu H., Kinloch A. J., Dear J. P. Drop-weight impact of composite laminates: modelling the effect of a round-nosed versus a flat-ended impactor. *Applied Composite Materials*. 2025. Vol. 32, Is. 3. P. 791-814. <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10315-7>.
  13. Flores M., Mollenhauer D., Runatunga V., Bebernis T., Rapping D., Pankow M. High-speed 3D digital image correlation of low-velocity impacts on composite plates. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 131. P. 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.078>.
  14. Tabatabaeian A., Jerkovic B., Harrison P., Marchiori E., Fotouhi M. Barely visible impact damage detection in composite structures using deep learning networks with varying complexities. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 264. 110907. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110907>.
  15. Hasebe S., Higuchi R., Yokozeki T., Takeda S. Prediction of compression after impact strength from surface profile of low-velocity impact damaged CFRP laminates using machine learning. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. Vol. 189. 108560. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108560>.

**Pedan Yevhen** – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 5706199@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8761-750X>.