ВПЛИВ ПОЧАТКОВОГО ЗАЗОРУ НА РУЙНУВАННЯ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

О. П. МАКСИМЕНКО [1], *М. М. ГВОЗДЮК* [1], *Я. П. КУЛИНИЧ* [1], *Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ* [1,2]

[1] *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*

[2] *Національний університет "Львівська політехніка"*

Подано результати експериментів з вивчення залежності контактних кутів для різних початкових зазорів у штифтовому з'єднанні від навантаження. Враховуючи зміну площі поверхні взаємодії композитних пластин зі штифтом, визначили несучу здатність отвору. Для отримання експериментальних результатів використано модифікований кореляційний алгоритм цифрової обробки зображень.

Ключові слова: *початковий зазор, контактний кут, цифрова кореляція зображень, напруження зминання, болтові з'єднання, полімерні композиційні матеріали.*

The results of experiments studying the contact angle dependence for different initial gaps at a pin joint under loading are presented. Considering the change of the interacting surface area of the composite plates with a pin, the bearing capacity of the hole is determined. The modified correlation algorithm for digital image processing is used to obtain the experimental results.

Keyword: *initial clearance, contact angle, digital image correlation, bearing stress, bolt joints, polymer composites materials.*

Вступ. Економічно обумовлені тенденції до зменшення маси літальних апаратів спонукає застосовувати полімерні композиційні матеріали (ПКМ) для виготовлення вузлів і агрегатів. У зв'язку з цим виникає потреба удосконалення технології їх з'єднання, які є найбільш критичними елементи любої конструкції, і в авіації на них припадає ~ 80% випадків руйнувань [1]. Для з'єднання ПКМ, враховуючи їх структуру і технологію виробництва, найоптимальнішим є склеювання, яке забезпечує передачу зусиль, наближених до суцільного матеріалу. Водночас у літакобудуванні використовують болтові з'єднання ПКМ. Вони мають меншу міцність порівняно з клеєними та заклепковими з'єднаннями, але у них є суттєві переваги під час складання, обслуговування та ремонту. Це обумовлює актуальність дослідження механічних характеристик болтових з'єднань.

Міцність болтового з'єднання залежить від низки змінних параметрів – сили затиску, коефіцієнта тертя між з'єднувальними деталями, розміру початкового зазору між тілом болта та поверхнею отвору тощо. Теоретичний розрахунок міцності з'єднання з одночасним врахуванням перерахованих параметрів вимагає складних математичних викладок і розроблення відповідних числових методів з подальшою експериментальною верифікацією отриманих результатів.

Стан проблеми. Відома низка експериментальних і теоретичних досліджень впливу на міцність з'єднання розміру зазору залежно від схеми армування ПКМ [2], конструкції з'єднання [3], зусилля затиску [4, 5] та інших параметрів [6, 7]. Для роз'ємних з'єднань вузлів і агрегатів літальних апаратів, виготовлених із ПКМ,

Контактна особа: О. П. МАКСИМЕНКО, e-mail: maksymenko@ipm.lviv.ua

нормативними документами встановлено допуски на початковий зазор у межах від 60 до 120 μm. Їх перевищення зменшує загальну жорсткість з'єднання під час руйнування [8] та збільшує деформації, за яких руйнується з'єднання [9], при цьому спостерігаємо поступове зростання жорсткості з'єднання від початку навантаження. Результати багатьох досліджень показують, що вплив зазору меншого за 80 μm на міцність з'єднання не перевищує 10% і ним можна нехтувати в інженерних розрахунках [10–13].

Таким чином, початковий зазор змінює механізм руйнування з'єднання, його жорсткість та витривалість залежно від схеми армування композита та геометричних параметрів з'єднання. Оскільки розмір зазору може змінюватись під час експлуатації конструкції і перевищувати допустимі значення, то його визначення необхідне для контролю стану і прогнозування надійності розбірних болтових з'єднань.

Формулювання задачі. Під час експериментальних досліджень механічних характеристик з'єднань необхідно визначати деформації отвору за різного навантаження. Стандартні методи вимірювань передбачають використання різноманітних механічних екстензометрів, які контактують з поверхнею досліджуваного зразка. Їх основними недоліками є неможливість отримання просторових розподілів деформацій матеріалу в околі отвору, необхідних для встановлення областей локалізації напружень, та значні випадкові похибки вимірювання, зумовлені неконтрольованим рухом зразка під час навантаження. Цих недоліків позбавлений безконтактний метод на основі цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [14–16]. Проте його застосування для дослідження впливу зазору на характеристики з'єднань висвітлено в поодиноких працях.

Зокрема, досліджували [17] вплив схеми армування композита, діаметра отвору і сили затиску одиночного болтового з'єднання на його механічні властивості. За допомогою системи "Vic3D", яка реалізує метод ЦКЗ, експериментально визначили розподіли деформацій біля отвору болтового з'єднання і за ними оцінили жорсткість з'єднання для різних діаметрів отвору (3, 6 і 10 mm). Проте у цьому дослідженні відсутня оцінка впливу зазору на міцність з'єднання, що не дозволяє використовувати отримані результати за початкового зазору у з'єднанні.

Використовуючи метод ЦКЗ, досліджували [18] вплив різних початкових зазорів (40, 80 і 120 μm) та сили затиску на жорсткість одиночного болтового з'єднання пластин рівноміцного шаруватого вуглепластика T300/QY8911 з орієнтацією волокон армування $[(+45°/0°/–45°/90°)_2]_s$. У з'єднанні використовували болти ∅ 4 mm, виготовлені зі сталі та титану. Отримані просторові розподіли деформацій показують, що початковий зазор у з'єднанні збільшує локалізацію деформацій у місці контакту тіла болта з отвором порівняно зі з'єднанням без зазору. Проте під час оцінювання жорсткості з'єднання не враховували залежності площі контактуючих поверхонь та контактного кута від початкового зазору за різного навантаження.

Відомо, що міцність з'єднання, крім інших чинників, суттєво залежить від площі контакту тіла болта з ПКМ. Її зменшення негативно впливає на жорсткість з'єднання. Враховуючи, що до моменту руйнування товщина ПКМ біля отвору практично не змінюється, оцінюватимемо площу контакту з'єднуваних деталей за зміною контактного кута. Отже, встановлення залежності контактного кута від навантаження за різних початкових зазорів у з'єднанні дозволить розрахувати дійсні площу контакту і напруження.

У болтових з'єднаннях край отвору зазвичай закритий шляпкою болта або шайбою, тому встановлення дійсної площі контакту тіла болта з отвором за зміни навантаження дуже складно отримати експериментально. Передбачають, що оцінити ці зміни можна наближено після встановлення співвідношень між характерними розмірами зони зминання, де деформації перевищують певний середній

рівень, та контактним кутом. Тут використовували схему навантаження зразків через отвір за допомогою жорстко закріпленого сталевого штифта, яка дала змогу візуально спостерігати за зоною контакту і дослідили вплив зазору на площу контактуючих поверхонь у з'єднанні. При цьому фактично нехтували зусиллями затиску, вважаючи, що вони суттєво не змінять форму зони зминання та вплинуть тільки на значення деформацій у ній, а отримані залежності можна використати для реальних болтових з'єднань з певним коригувальним коефіцієнтом.

Мета роботи – експериментальне дослідження зміни кута контакту і площі контактуючих поверхонь від навантаження зразків ПКМ з різним початковим зазором та визначення дійсних напружень зминання і жорсткості з'єднання.

Зразки і методика досліджень. Для досліджень удосконалили раніше розроблені алгоритми обробки цифрових зображень [15, 16, 19], розробили експериментальну установку і методику оцінювання зміни кута контакту та розрахували напруження зминання за різного навантаження для низки тестових зразків з різним початковим зазором.

Експериментували на плоских зразках 2,6×25×100 mm, виготовлених з вуглепластика ЕЛУР-008 з орієнтацією шарів армування $[(-45°/+45°)_{12}]_s$. Їх навантажували розтягом за допомогою сталевого штифта ∅ 10 mm. Для моделювання впливу розміру зазору на характеристики з'єднання, номінальний діаметр отвору у зразках після свердління збільшили за допомогою розгорток до 10,05; 10,1 і 10,2 mm. Відстань від центра отвору до вільного краю зразка – 22 mm, що забезпечувало руйнування зразків за механізмом зминання.

Досліджувані зразки і навантажувальна установка з приладами контролю сили навантаження та відеокамерою показані на рис. 1. Нижню частину зразка ПКМ з наклеєними захисними накладками фіксували у нижніх захоплювачах розривної машини, а верхню залишали вільною. Навантажували зразки за отвір через жорстко закріплений у верхніх захоплювачах штифт. Для зменшення похибки алгоритму ЦКЗ під час визначення переміщень малих ділянок поверхні на неї попередньо наносили термічним способом дрібний чорно-білий контрастний малюнок.

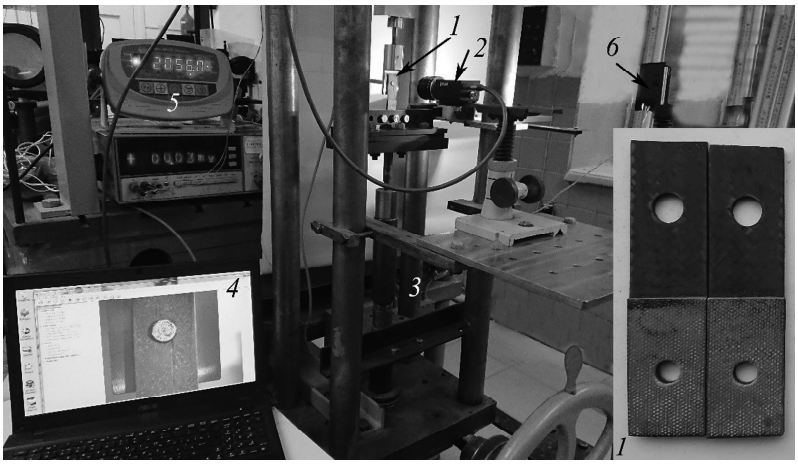


Рис. 1. Установка для дослідження механічних з'єднань: *1* – зразки, *2* – цифрова відеокамера Mono Grasshoppers 3 GS-U3-9156M з об'єктивом Computar, *3* – навантажувальна установка, *4* – комп'ютер з програмним забезпеченням для обробки зображень, *5* – контролер навантаження, *6* – світлодіодне джерело світла.

Fig. 1. Installation for studying mechanical joints: *1* – samples, *2* – digital camera Mono Grasshoppers 3 GS-U3-9156M with Computar lens, *3* – loading device, *4* – computer with image processing software, *5* – controller of load, *6* – LED light source.

У збільшеному масштабі механізм взаємодії штифта з отвором за наявності зазору схематично показано на рис. 2*a* (початковий стан) та рис. 2*b* (після деформування), де P_0 – початкове зусилля в момент контакту штифта з внутрішньою поверхнею отвору і P_B – зусилля зминання отвору; d і d_b – початкові діаметри отвору і штифта, відповідно; δ_0 і δ_c – початковий зазор та 2% овалізації отвору під навантаженням; $\overline{\delta}_1$ і $\overline{\delta}_2$ – усереднені значення переміщень ряду малих ділянок поверхні ПКМ біля отвору; θ_c – контактний кут і σ_r – радіальні напруження. Оскільки середнє значення зусилля руйнування досліджуваних зразків ПКМ не перевищувало 6 kN, то впливом деформації тіла сталевого штифта нехтували.

Визначення контактного кута і деформацій отвору. Деформацію отвору визначали безконтактно двома методами, опрацьовуючи зареєстровані зображення модифікованими кореляційними алгоритми, а міцність з'єднання оцінювали за рекомендаціями стандарту ASTM D 5961/5961M–01 [20]. За першим методом [21] використовували середні значення вертикальних переміщень $\overline{\delta}_1$ і $\overline{\delta}_2$ ряду малих ділянок на поверхні зразка (рис. 2*b*), а за другим – вертикальні переміщення малих ділянок поверхні, центри яких збігалися з точками кола *4*, які рівномірно розташовані біля краю отвору (рис. 2*a*). Початковий радіус цього кола R_0 вибирали так, щоб центри ділянок розміщувались на поверхні зразка якомога ближче до краю отвору (рис. 3). Просторове розділення системи відеокамера–об'єктив, які використовували під час експерименту, та можливості модифікованого алгоритму ЦКЗ, дозволяли контролювати переміщення ділянок розміром 0,4×0,4 mm з абсолютною похибкою 0,1 mm. Центри цих ділянок знаходились на відстані від краю отвору не менше за 0,3 mm.

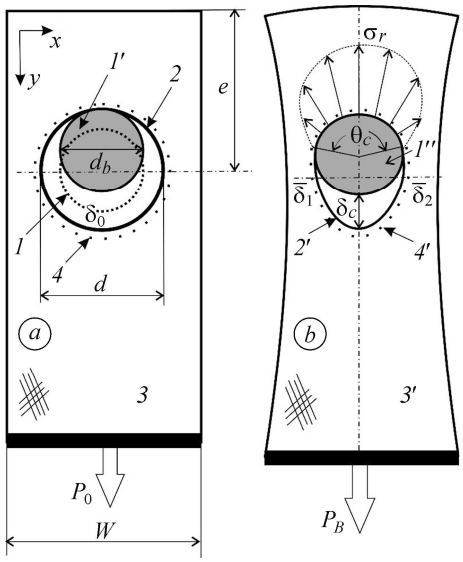


Рис. 2. Взаємодія штифта з отвором за наявності зазору: *a* – початковий стан; *b* – після навантаження; *1* – початкове положення штифта, *1′* – перший контакт штифта з отвором і *1″* – після навантаження зусиллям зминання; *2* і *2′* – край отвору до і після деформування; *3* і *3′* – зразок ПКМ до і після навантаження; *4* і *4′* – коло точок на поверхні зразка до і після навантаження.

Fig. 2. Interaction of a pin with a hole in the presence of clearance: *a* – initial state; *b* – after loading; *1* – initial position of the pin, *1′* – first contact of the pin with a hole and *1″* – after loading by bearing stress; *2* and *2′* – hole edge before and after loading; *3* and *3′* – polymer composite material specimen before and after loading; *4* and *4′* – circle of points on the surface of the sample before and after loading.

Розтягувальні зусилля, прикладені до зразка, деформували його поверхню, і ділянки, розташовані на колі *4*, переміщувались у напрямку прикладеного навантаження. Це збільшувало розмір кола, на якому розташовані їх центри, перетворюючи його в еліпсоподібну фігуру, більшу піввісь якої позначено R. Враховуючи достатньо малу відстань цих точок до краю отвору, приймали, що абсолютне видовження отвору в напрямку навантаження дорівнювало різниці $R - R_0$ (рис. 3).

Відносні деформації отвору за першим і другим методами розраховували відповідно так:

$$\varepsilon_1 = (\overline{\delta}_1 + \overline{\delta}_2) / 2d \,, \qquad (1)$$

$$\varepsilon_2 = (R - R_0) / R_0 \,. \qquad (2)$$

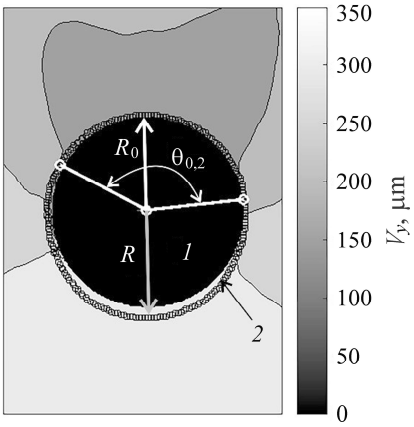


Рис. 3. Контактний кут за навантаження зразка 5,5 kN: *1* – штифт, *2* – малі ділянки на поверхні зразка біля краю отвору.

Fig. 3. Contact angle after sample loading at 5.5 kN: *1* – a pin, *2* – small areas on the sample surface at the hole edge.

Переміщення ряду ділянок, розташованих біля отвору, і видовження R розраховували за полями переміщень всієї поверхні зразка, які отримували кореляційними алгоритмами на кожному етапі навантаження до моменту руйнування зразка. Крок навантаження 250 N. Один з таких розподілів переміщень подано на рис. 3, де позначено контактний кут $\theta_{0,2}$, що відповідає 2%-му деформуванню отвору. Модифіковане програмне забезпечення автоматично розраховувало значення контактного кута θ_c на кожному кроці навантаження з похибкою, яка не перевищувала 2°. Для цього встановлювали всі малі ділянки на краю отвору *2*, які контактують зі штифтом *1*.

Експериментально отримані залежності відносних деформацій отвору, розрахованих за виразами (1) і (2) для двох різних початкових зазорів, наведені на рис. 4. Вони показують, що початковий зазор несуттєво впливає на деформації отвору, проте їх характери відрізняються. Значення деформацій, отримані за виразом (1), на 40...50% більші за значення, отримані за формулою (2), за того ж навантаження. Водночас за більшого початкового зазору при перевищенні допустимого значення овалізації отвору на 2% отримаємо менші деформації отвору, обчислені за виразом (1).

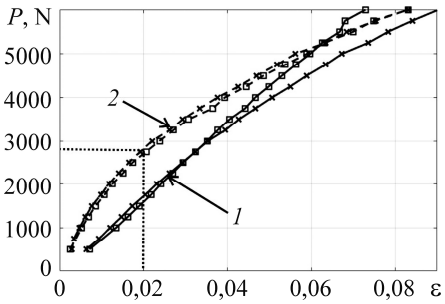


Рис. 4. Деформації отвору зразків з початковим зазором δ_0: × – 0,1 mm; □ – 0,2 mm; *1*, *2* – розраховані за виразами (1) та (2), відповідно.

Fig. 4. Hole deformation of the samples with an initial gap δ_0: × – 0.1 mm; □ – 0.2 mm; *1*, 2 – calculated by equation (1) and (2), respectively.

Відмінність отриманих значень обумовлена тим, що для визначення деформацій отвору використовують різні ділянки поверхні зразка. Якщо використовувати ділянки значно віддалені від твірної отвору, то до деформацій отвору додаються деформації тіла зразка, що завищує сумарні деформації. Дійсні деформації отвору завжди суттєво менші за деформації поверхні зразка, визначені у точках, віддалених від краю отвору. Це викликано формуванням локальної області стискальних деформацій біля штифта, де зминається матеріал, внаслідок чого розмір отвору збільшується несуттєво, при цьому деформації тіла зразка істотно перевищують деформації отвору.

Таким чином, використовуючи для вимірювання ділянки поверхні, які віддалені від отвору, завжди отримуємо завищені значення деформацій отвору, ніж дійсні значення, при цьому за таких вимірювань оцінка жорсткості з'єднань занижуватиметься на декілька десятків відсотків. Також під час розрахунку напружень зминання і жорсткості з'єднання з початковим зазором потрібно враховувати зміну площі контактуючих поверхонь.

Дійсні напруження зминання штифтового з'єднання. Нехтуючи впливом зазору, за стандартом [20] визначають напруження зминання через умовну площу контакту, яка дорівнює добутку діаметра отвору d на товщину зразка t, так:

$$\sigma = P / (d \cdot t), \tag{3}$$

де P – прикладене навантаження. При цьому вважають, що напруження розподілені рівномірно на площі контакту, а контактний кут у з'єднанні сталий і становить ±90°.

Натомість відомо, що радіальні напруження розподіляються нерівномірно на контактуючій поверхні і залежать від схеми армування ПКМ та зусилля тертя. Здебільшого під час розрахунку їх апроксимують виразом [22] (рис. 2*b*)

$$\sigma_r = -4P\cos(\alpha) / (\pi \cdot d \cdot t), \tag{4}$$

де $\alpha = \pm\theta_c / 2$ половина контактного кута, який відраховується від вертикальної осі зразка.

Очевидно, що від початкового зазору залежить контактний кут і, відповідно, розподіл напружень, який разом зі структурою армування ПКМ і геометрією з'єднання визначають характерні розміри і форму зони зминання.

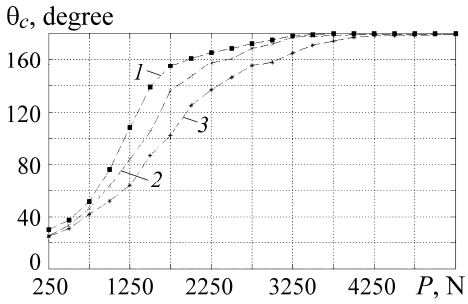
Експериментально досліджено напруження зминання для з'єднань з різним початковим зазором за зміни навантаження. Під час навантаження з'єднання з початковим зазором δ_0 контактування спершу мале за площею, після чого отвір починає деформуватись. Кут контакту та, відповідно, площа поступово збільшується і, зазвичай, досягає максимального значення перед руйнуванням, наближаючись до ±90°.

На рис. 5 подано залежності контактного кута від навантаження для досліджуваних зразків з різним початковим зазором. Бачимо, що збільшення зазору призводить до плавнішого зростання контактного кута. Нехтуючи зміною товщини зразка в місці контакту, реальну площу контакту штифта з отвором оцінювали так:

$$S_c = \pi t d_b \theta_c / 360. \tag{5}$$

Рис. 5. Зміна кута контакту під час навантаження зразків з різним початковим зазором: *1* – 0,05 mm; *2* – 0,1 mm; *3* – 0,2 mm.

Fig. 5. Change of the contact angle during loading of samples with a different initial gap: *1* – 0.05 mm; *2* – 0.1 mm; *3* – 0.2 mm.



В подальшому, враховуючи отримане значення площі контакту (5) і приймаючи розподіл напружень за формулою (4), розраховували радіальні напруження у з'єднанні зі зазором

$$\sigma_{cr} = P\cos(\alpha) / S_c. \tag{6}$$

Розраховані зміни (рис. 6) максимальних напружень зминання за умови $\alpha = 0$ до моменту руйнування з'єднання для зразків з великим початковим зазо-

ром, отримані за умовною площею контакту (суцільна лінія) і з врахуванням реальної площі контакту за виразами (5), (6) – пунктирна.

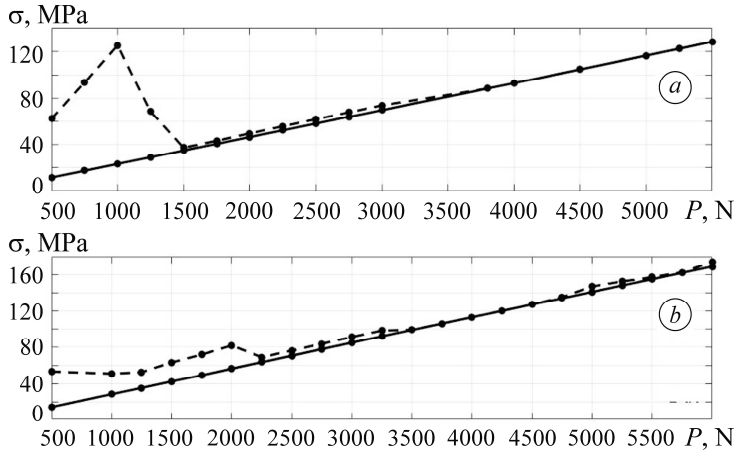


Рис. 6. Напруження зминання зразків з початковим зазором 0,2 mm (*a*) та 0,1 mm (*b*).

Fig. 6. Bearing stress of the samples with the initial gap 0.2 mm (*a*) and 0.1 mm (*b*).

Отримані залежності засвідчують виникнення стрибка напружень за наявності зазору на початку навантаження. Це обумовлено малою площею контакту. У подальшому, зі збільшенням навантаження зростає площа контакту, напруження знижуються і практично зрівнюються з напруженням, розрахованим для умовної площі контакту. Для зазору 0,2 mm ці початкові напруження близькі до напружень руйнування досліджуваного ПКМ. Тому такий розмір зазору недопустимий, оскільки виникають локальні руйнування з'єднання за початкових навантажень.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив початкового зазору на жорсткість з'єднання. Показано, що на початковій стадії навантаження зазор зменшує площу контактуючих елементів і, відповідно, збільшує локальні напруження, які ініціюють руйнування з'єднання. Для зразків, які мали менший початковим зазор, контактний кут досягає свого максимального значення (180°) швидше порівняно зі зразками з більшим початковим зазором. Для досліджуваних зразків ПКМ, згідно з отриманими експериментальними результатами, середнє зусилля зминання, за якого овалізація отвору сягала 2%, становило 2 kN. Це підтверджує незалежність кінцевої жорсткості з'єднання досліджуваних композитів від початкового зазору, однак, за його збільшення до 0,2 mm спостерігаємо стрибок напружень на початку навантаження, які співмірні з критичними напруженнями досліджуваного матеріалу, що ініціює передчасні локальні мікроруйнування з'єднання. Всі зразки руйнувались за механізмом зминання, а перші пошкодження матриці спостерігали в напрямку армування під кутами ±45° до осі зразка.

1. *Карпов Я. С.* Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2006. – 360 с.
2. *Lawlor V. P., McCarthy M. A., and Stanley W. F.* Experimental study on the effects of clearance on single-bolt, single-shear, composite bolted joints // J. of Plastics, Rubber and Composites. – 2002. – **31**, № 9. – P. 405–411. (doi: 10.1179/146580102225006521)
3. *Stress* analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance / B. Egan, C. T. McCarthy, M. A. McCarthy, and R. M. Frizzell // Composite Structures. – 2012. – **94**, № 3. – P. 1038–1051. (doi: 10.1016/j.compstruct.2011.10.004)

4. *The effect* of preload on failure response of glass-epoxy laminated composite bolted-joints with clearance / M. Pakdil, F. Sen, O. Sayman, and S. Benli // J. of Reinforced Plastics and Composites. – 2007. – **26**, № 12. – P. 1239–1252. (doi: 10.1177/0731684407079769)
5. *Experimental* failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload / S. Faruk, P. Murat, S. Onur, and B. Semih // Materials & Design. – 2008. – **29**, № 6. – P. 1159–1169. (doi: 10.1016/ j.matdes.2007.05.009)
6. *Three-dimensional* finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints. Part I – model development and validation / M. A. McCarthy, C. T. McCarthy, V. P. Lawlor, and W. F. Stanley // Composite Structures. – 2005. – **71**, № 2. – P. 140–158. (doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.024).
7. *McCarthy C. T. and McCarthy M. A.* Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints. Part II – effects of bolt-hole clearance// Composite Structures. – 2005. – **71**, № 2. – P. 159–175. (doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.023)
8. *Pierron F., Cerisier F., and Grediac M.* A numerical and experimental study of woven composite pin-joints // J. of Composite Materials. – 2000. – **34**, № 12. – P. 1028–1054. (doi: 10.1177/002199830003401204)
9. *Khashaba U. A., Sebaey T. A., and Alnefaie K. A.* Failure and reliability analysis of pinned-joint composite laminates: effects of pin-hole clearance // J. of Composite Materials. – 2012. – **47**, № 18. – P. 2287–2298. (doi: 0.1177/0021998312457196)
10. *Esendemir Ü.* An experimental study of mechanically fastened composite joints with clearance // Int. J. of Damage Mechanics. – 2010. – **20**, № 3. – P. 464 –480. (doi: 10.1177/1056789510397068)
11. *Kiral B. G.* Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites // Materials & Design. – 2010. – **31**, № 1. – P. 85–93. (doi:10.1016/j.matdes.2009.07.009)
12. *Kelly G. and Hallström S.* Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance // Composites Part B: Engineering. – 2004. – **35**, № 4. – P. 331–343. (doi: 10.1016/j.compositesb.2003.11.001)
13. *Distribution* of crushing stresses in multirow riveted joints / O. P. Maksymenko, O. I. Semenets, M. M. Hvozdyuk, V. A. Znova, and Ya. L. Ivanytskyi // Materials Science. – 2023. – **58**, № 3. – P. 369–376. (doi: 10.1007/s11003-023-00673-7)
14. *Sutton M. A., Orteu J. J., and Schreier H.* Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements (Basic Concepts, Theory and Applications). – New York: Springer, 2009. – 364 p. (doi: 10.1007/978-0-387-78747-3)
15. *Maksymenko O. P., Ivanyts'kyi Ya. L., and Hvozdyuk M. M.* Evaluation of the stiffness of a composite–metal joint by the method of digital image correlation // Materials Science. – 2015. – **50**, № 6. – P. 817– 823. (doi: 10.1007/s11003-015-9788-x)
16. *Evaluation* of the strength of bolted joints of composite plates / Ya. L. Ivanyts'kyi, M. M. Hvozdyuk, O. P. Maksymenko, S. Kłysz, E. V. Kharchenko, and R. O. Shyshkovs'kyi // Materials Science. – 2019. – **55**, № 2. – P. 265–271. (doi: 10.1007/s11003-019-00298-9)
17. *Haris A., Tay T. E., and Tan V. B. C.* Experimental analysis of composite bolted joints using digital image correlation // In J. MECH. ENG. SCI. – 2017. – **14**, № 1. – P. 2443–2455. (doi: 10.15282/jmes.11.1.2017.4.0225)
18. *An experimental* study on the effect of bolt-hole clearance and bolt torque on single-lap, countersunk composite joints / Y. Zhai, D. Li, X. Li, L. Wang, and Y. Yin // Composite Structures. – 2015. – **127**. – P. 411–419. (doi: 10.1016/j.compstruct.2015.03.028)
19. *Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // Materials Science. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–645. (doi: 10.1007/s.11003-005-0095-9)
20. *ASTM D 5961/5961M-01* Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates. – American Society for Testing of Materials, 2003. – 26 p.
21. *Патент* України на корисну модель № 116508. Спосіб визначення жорсткості механічного з'єднання "композит–метал" / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, М. М. Гвоздюк, Л. І. Муравський, Ю. В. Мольков. – Опубл. 25.05.2017; Бюл. № 10.
22. *Chang F-K.* The effect of pin load distribution on the strength of pin loaded holes in laminated composites // J. of Composite Materials. – 1986. – **20**, № 4. – P. 401–408. (doi: 10.1177/002199838602000407)

Одержано 09.01.2023