

УДК 39.3+534.13+629.783

## Програма для експрес-аналізу болтового з'єднання пластин з шаруватого композиційного матеріалу на міцність, з врахуванням технологічних факторів

Бабієнко С.А., Дифучин Ю.М., Рудаков К.М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

*Анотація.* У сучасних комп'ютерних САД-системах не має супроводу такий конструктивний елемент, як болтове з'єднання (БЗ) пластин з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Тому актуальність мають дослідження, що проводяться для створення відповідного інструментарію у вигляді додаткових програм. Представлений такий додаток ВЖЕ (Bolted Joint Emulations), створений авторами на основі наявних результатів імітаційних розрахунків БЗ із шаруватими ПКМ і добору відповідних аналітичних розв'язків, виявлених функціональних залежностей, апроксимацій. Особливість даної розробки – врахування впливу основних технологічних факторів БЗ: зусилля затягування, бічних зазорів, схеми укладання шарів у шаруватому ПКМ, інших.

*Ключові слова:* болтове з'єднання; 3D скінченно-елементна емуляція; міцність; ламінат; ортотропія; коефіцієнт концентрації напружень.

**Вступ.** При конструюванні виробів усе частіше застосовують шаруваті ПКМ з армуванням вуглецевою або іншою ниткою або тканиною. Деталі із ПКМ з'єднують із іншими частинами виробу методами склеювання, затиснення, а також за допомогою штифтів, гвинтів і болтів [1]. В останньому варіанті роблять круглі отвори, і такі з'єднання узагальнено й спрощено називають болтовими з'єднаннями (БЗ).

Інженерів-конструкторів бажане мати прості формули, що дозволяють із задовільною точністю розрахувати міцність запропонованого конструктивного рішення, тобто провести так званий експрес-аналіз [2]. Але ПКМ самі по собі є складною конструкцією, тому наявні формули експрес-аналізу, обґрунтовані для однорідних металів, необхідно модифікувати. Таке завдання досі є актуальним.

Зокрема, для проведення експрес-аналізу на розрив пластини в ослабленому круглим отвором, навантаженим болтом, перетині традиційно застосовують формулу [2]:

$$\frac{N\alpha}{h(w-d)} \leq [\sigma]_t, \quad (1)$$

де  $N$  – результуюче зусилля, що навантажує перетин;  $\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{ном}}$  – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень (ККН) біля отвору, навантаженого болтом;  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{ном}}$  максимальне та номінальне напруження (використовуються рівняння лінійної пружності);  $h$ ,  $w$  – товщина й ширина пластини в зоні отвору діаметром  $d$ ;  $[\sigma]_t$  – напруження на розрив матеріалу, що допускається. При проведенні розрахунків відомі всі величини, крім ККН.

Розрізняють три випадки для розрахунків ККН в отворі: отвір вільний від навантаження (позначили ККН як  $\alpha$ ), отвір навантажений болтом (ККН  $\underline{\alpha}$ ), отвір заповнений іншим матеріалом. Відомо, що завжди  $\underline{\alpha} > \alpha$ .

Для визначення ККН в отворі, навантаженому болтом, необхідно розв'язати контактну негерцеву задачу, оскільки зазор допускається, але незначний, тобто геометрія зони контакту є майже погодженою. Ця задача є дуже складна навіть для ізотропного випадку, у ПКМ ще додаються анізотропія й неоднорідність, тобто проблема значно ускладнюється.

Шаруваті ПКМ моделюють як сукупність моношарів. Вважається, що матеріал моношару є ортотропним. Кожний моношар має свій напрямок укладання. Призначається основний напрямок, записується схема укладання в ПКМ [3]. Моношари на виході в отвір, при контакті з болтом, по-різному пручаються навантаженню. На це впливають і кути укладання, і анізотропія, і умови нерозривності переміщень у їхньому конгломераті (взаємовплив), тощо.

Очевидно, що руйнування найбільш навантаженого моношару спровокує швидке руйнування інших. Тому формулу (1) необхідно застосовувати для цього моношару. Таких досліджень у літературі небагато, і всі вони використовують метод скінченних елементів (МСЕ). Це потребує багато часу та значну компетентність. Тому актуальне імітаційне моделювання БЗ за допомогою спеціалізованих додатків.

**Зв'язані роботи.** Можливо, перша й найпоширеніша імітаційна програма для проведення експрес-аналізу міцності з'єднань, зокрема й БЗ, описана в [4, 5]: BJSFM (Bolted Joint Stress Field Model), від McDonnell Douglas Corporation. Програма одержала розвиток й увійшла до складу програмного комплексу Hypersizer [6]. Основою BJSFM є експериментальні дані, отримані на базових моделях, а для конкретної реалізації з'єднання використовуються численні поправочні коефіцієнти, що відбивають корпоративний досвід проектування й результати порівняння з більш розвиненими моделями, зокрема й скінченно-елементними моделями (СЕМ). Однак вплив таких технологічних факторів, як зазори й схеми укладання шаруватих ПКМ, вона не враховує (замість схем укладання використовується відсоткове співвідношення шарів з однаковим кутом укладання, а цього недостатньо).

В [7] наведений короткий огляд існуючих на той момент додатків по даній тематиці.

Досить довго моделювання БЗ за МСЕ проводили як плоску (2D) конструкцію. У міжнародному проекті BOJCSAS (болтові з'єднання в композитних авіаційних конструкціях, 2000-2003 рр. і трохи пізніше) були проведені численні імітаційні розрахунки за МСЕ 3D- контактних моделей БЗ, але властивості композитів усереднювали по всій товщині пластини [8]. Зі збільшенням потужності комп'ютерів у 2012 році з'явилося пошарове моделювання ПКМ у зоні отвору. Вплив технологічних факторів не розглядався. У [3, 9] можна побачити лише рекомендації загального виду.

У КПІ ім. Ігоря Сікорського виконано значний цикл робіт, пов'язаний з комп'ютерним моделюванням БЗ із ПКМ, з урахуванням основних технологічних факторів. Спочатку використовували усереднені моделі ПКМ [10], потім – пошарові біля отворів, для чого обґрунтували мінімальний розмір області пошарового моделювання, що не вносить додаткових похибок. 3D-контактні СЕ моделі стали змішаними (блоковими), що дозволило одержувати достатню точність розрахунків на персональних комп'ютерах підвищеної потужності. Було показано, що всі особливості БЗ із ПКМ значно сильніше проявляються в однозрізних БЗ, у порівнянні із двозрізними. Тому надалі зосередилися на однозрізних БЗ.

У подальших роботах розглядали вплив двох технологічних факторів: бічних зазорів системи "болт-отвір", а також схеми укладання шарів у ПКМ, на контактні зусилля, що реалізуються в системі, і на ККН [11, 12]. При цьому створювали імітаційні 3D- контактні моделі зразка для випробувань на утому однозрізного болтового з'єднання із ПКМ.

На основі проведеного аналізу запропоновано, зокрема, представити для формули (1) залежність ККН біля найбільш навантаженого (1-го) отвору у вигляді

$$\alpha = \tilde{\alpha} \cdot \psi = \tilde{\alpha} \cdot f(\delta) \cdot f^*(z_0^*) \approx \tilde{\alpha} \cdot (1 - \beta \cdot \delta) \cdot [1 + \gamma \cdot (z_0^* - \underline{z}_0^*)] \cdot k, \quad (2)$$

де  $\psi$  – функція впливу технологічних факторів;  $f(\delta) = (1 - \beta \cdot \delta)$  – функція впливу величини бічного зазору (на діаметр)  $\delta$  системи "болт-отвір";  $f^*(z_0^*) = [1 + \gamma \cdot (z_0^* - \underline{z}_0^*)]$  – функція впливу структури пластини із ПКМ;  $z_0^*$  – відстань середини найбільш віддаленого від серединної

поверхні пластини із ПКМ шару з кутом укладання нуль градусів  $z_{0\max}$ , розділене на половину товщини  $h$  цієї пластини, тобто  $z_0^* = z_{0\max} / (h / 2)$ ;  $z_0^*$  – значення  $z_0^*$  для "базової" структури, щодо якої проводяться порівняння, щоб  $f_i^*(z_0^*) = 1$ ;  $\beta$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти апроксимації;  $k$  – коефіцієнт запасу;  $\tilde{\alpha}$  – ККН для моношару з ортотропного матеріалу, визначений по одній з обґрунтованих формул, наведених нижче.

Перша формула – розв'язок Echavarrri'a-Haller-Salenikovich [13]:

$$\tilde{\alpha}(\zeta) = \frac{1-\zeta}{\zeta} \left[ \frac{\zeta}{2} + \left( \frac{\zeta}{2} + \frac{4}{\pi^2} \right) \frac{\sqrt{2(\sqrt{E_{YY}/E_{XX}} - \mu_{YX}) + E_{YY}/G_{XY}}}{\sqrt{E_{YY}/E_{XX}}} \right], \quad (3)$$

де  $\zeta = d / w \leq 0.5$ ;  $E_{XX}$ ,  $E_{YY}$ ,  $G_{XY}$ ,  $\mu_{YX}$  – модулі пружності ортотропного моношару.

Друга формула запропонована в роботі [14]:

$$\tilde{\alpha}(\zeta) \approx \underline{\alpha}(\zeta) \cdot \{1 + (1 - \zeta) \cdot [\tilde{\alpha}(0) - \alpha(0)] / \alpha(\zeta)\}, \quad (4)$$

де відомі апроксимації:

$$\underline{\alpha}(\zeta) \approx 12.882 - 52.714\zeta + 89.762\zeta^2 - 51.667\zeta^3; \quad (5)$$

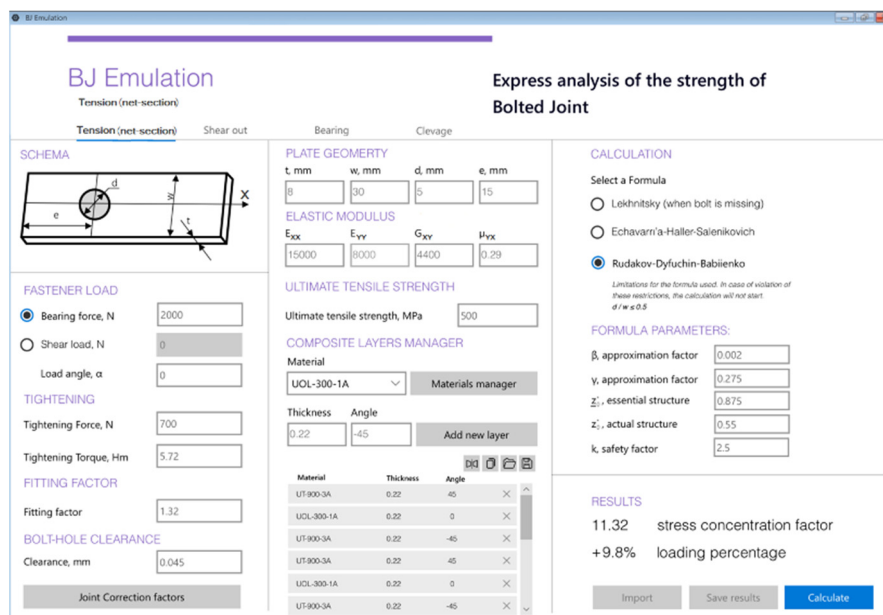
$$\alpha(\zeta) \approx 3.000 - 3.140\zeta + 3.667\zeta^2 - 1.527\zeta^3; \quad \alpha(0) = 3; \quad (6)$$

а також розв'язок Лехницького для вільного від навантаження болтом отвору

$$\tilde{\alpha}(0) = 1 + \sqrt{2\sqrt{E_{XX}/E_{YY}} + E_{XX}/G_{XY} - 2\mu_{XY}}. \quad (7)$$

Як показано в [14], обидві формули дають близькі, трохи завищені значення.

Отже, основою розрахунків ККН для формули (1) є формула (2), для якої можна використовувати теоретично добре обґрунтовані базові ККН із формул (3) й (4).



Інтерфейс імітаційного додатка ВЈЕ (Bolted Joint Emulation), вид руйнування Tension (net-section)

**ВЈЕ (Bolted Joint Emulation)** – доданок для експрес-аналізу міцності БЗ. Авторами повідомлення для оцінки міцності БЗ пластин із ПКМ при проектуванні створюється доданок, який працює в діалоговому режимі. Його основа – наявні результати імітаційних розрахунків БЗ із шаруватими ПКМ і добір відповідних аналітичних розв’язків, виявлених функціональних залежностей, апроксимацій. Особливість даної розробки – врахування впливу основних технологічних факторів БЗ: зусилля затягування, бічних зазорів, схеми укладання шарів у шаруватому КМ, інших.

У ВЈЕ розглядаються чотири різновиди можливого руйнування: Tension (net-section), Bearing, Cleavage та Shear out. Найбільш небезпечне з них – Tension (net-section), і саме йому присвячений наведений огляд публікацій. Одночасно у всіх випадках розглядається й міцність болта.

На рисунку показаний інтерфейс імітаційного додатка ВЈЕ для виду руйнування Tension (net-section). Інші варіанти відрізняються тільки заповненням правої частини діалогової панелі.

Наведена схема циклічно-симетричної частини пластини з отвором і передбачений діалог завдання геометричних параметрів, величини бічного зазору "болт-отвір", силового навантаження, регламентованого коефіцієнта запасу міцності, параметрів формули (3) та іншої інформативної. Ще передбачене введення властивостей матеріалів моношарів, а також опис їх укладання: як у діалоговому режимі, так і з архівного файлу; поповнення цього архіву. Після введення необхідних даних та проведення розрахунку видаються основні результати розрахунків: ККН  $\alpha$ , відсоток перевантаження (+) або недовантаження (–), автоматично все виводиться у файл звіту.

**Висновок.** Проведені численні модельні розрахунки й аналіз їх результатів дозволили перейти до створення імітаційної програми ВЈЕ (Bolted Joint Emulations) – діалогу для проведення експрес-аналізу міцності БЗ із шаруватими ПКМ. Вона модифікується, призначена для застосування в конструкторські бюро, у першу чергу – авіаційних.

#### Список літератури

1. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика: учебник / П.М. Гагауз, Ф.М. Гагауз, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда; под общ. ред. Я.С. Карпова – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", 2015. – 672 с.
2. Двейрин А.З. Обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального обеспечения проектирования агрегатов самолета из полимерных композитов с механическими соединениями деталей / А.З. Двейрин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 66. – С. 5-19.
3. ECSS-E-HB-32-20, Part 2A. Structural materials handbook – Part 2: Design calculation methods and general design aspects. (2011).
4. Clark, H.T. "Structural Evaluation of Composites", McDonnell Douglas Corporation, MDC Q0845-7-1, 1977.
5. Effect of variances and manufacturing tolerances on the design strength and life of mechanically fastened composite joints. 1978. McDonnell Aircraft Company, McDonnell Douglas Corporation. Technical report AFFDL-TR-78-179. <http://www.everyspec.com/>.
6. HyperSizer Corporation. <http://www.hypersizer.com/>.
7. Snyder, B.D., Burns, J.G., and Venkayya, V.B. "Composite Bolted Joints Analysis Programs," Journal of Composites Technology & Research, JCTRE, Vol. 12, No. 1, Spring 1990, pp. 41-51.
8. <http://www.smr.ch/>
9. Broughton W.R., Crocker L.E., Gower M.R.L. Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures. NPL Report MATC (A) 65, 2002. 50 p.
10. Рудаков К.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NAS-TRAN / К.Н. Рудаков, С.Н. Шукаев // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", сер. Машинобудування №67. – 2013. – С. 199-206.
11. Рудаков К.Н. К расчету односрезного болтового соединения на разрывное разрушение ослабленного отверстием сечения композитной пластины / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин // Mechanics and Advanced Technologies. #2(86), 2019. – С. 23-33. DOI: 10.20535/2521-1943.2019.86.177924.

12. Рудаков К.М. Визначення коефіцієнта концентрації напружень у послабленому отвором перерізі композитній пластини, при контакті отвору з циліндром / К.М. Рудаков, С.А. Бабиєнко, Т.І. Щербань // *Mechanics and Advanced Technologies*. #2(89), 2020. – С. 48-54. DOI: 10.20535/2521-1943.2020.89.204546.
13. Echavarrí 'a, C., Haller, P. and Salenikovich, A. (2007), Analytical study of a pin-loaded hole in elastic orthotropic plates. *Composite Structures*. vol.79. pp. 107–112. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.11.038.
14. Рудаков К.Н. Коэффициент концентрации напряжений у контактирующего с болтом нагруженного отверстия в монослое ортотропного композиционного материала / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин, С.А. Бабиенко // *Mechanics and Advanced Technologies*. #1(85), 2019. – С. 41-48. DOI: 10.20535/2521-1943.2019.85.155702

## Simulation application for express analysis of bolted joint of plates made of laminated composite material for strength taking into account technological factors

Serhii Babiienko, Yurii Dyfuchyn, Konstantin Rudakov

*Abstract.* The structural element in the form of bolted connection (BC) of plates from polymeric composite materials (PCM) is not supported in modern computer CAD systems in a convenient form for the express analysis. Therefore, research aimed at creating appropriate tools in the form of additional programs is relevant. The application BJE (Bolted Joint Emulations) is presented at the paper. It was created by the authors on the basis of available results of simulation calculations of BC of plates made of layered PCM.

*Selection of corresponding analytical solutions, the revealed functional dependences, approximations were used. The feature of this development is taking into account influence of the main technological factors: tightening force, side gaps, stuck of layers in the PCM, others.*

*Keywords:* bolted connection; 3D finite element emulation; strength; laminate; orthotropy; stress concentration factor.