

УДК 539.3

## РОЗРАХУНКИ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ НА ЗМИНАННЯ ОТВОРІВ В ПЛАСТИНІ З ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

**Дифучин Ю.М.**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** Раніше було створено 24 3D-моделі зразків однозрізного дворядного болтового з'єднання з ПКМ (контактна задача), в яких варіювалися структури ПКМ (6 варіантів), а також бічний зазор болтів з отворами (4 значення). Незмінними були величина сили стягування пакета і сила, що розтягує зразок. За результатами розрахунків визначено, зокрема, розподіл контактних тисків на поверхнях отворів, а також напружень в пластинах з ПКМ біля отворів (таблиці, графіки).

На основі зазначених даних і додаткових розрахунків отримані наступні результати:

- для проведення статичного розрахунку болтового з'єднання на зминання була введена функція впливу, параметрами якої є характеристики структури ПКМ і коефіцієнт вигину болта;
- уточнений вид функції впливу необхідно отримувати в додаткових дослідженнях (натурних або чисельних), що дозволить створити базу даних для величин цієї функції для актуальних в галузі варіантів силових болтових з'єднань з композитами.

**Ключові слова:** чисельне 3D моделювання; ПКМ; болтове з'єднання; змішана 3D-модель; МСЕ; структура ПКМ; зминання поверхні отвору;

Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) потребує розв'язання нових задач, однією з яких є задача міцності механічного з'єднання елементів з ПКМ. В авіації одним з найпоширеніших типів з'єднань композитів є болтове з'єднання (БЗ).

Початку накопичення некритичних руйнувань у ПКМ найчастіше передують зминання стінки отвору в місці його контакту з тілом з'єднувального елемента (болта) [1]. Тому коректне визначення рівня напруження зминання необхідно для забезпечення несучої здатності і ресурсу з'єднання.

Основним недоліком існуючої системи методів розрахунку механічного з'єднання композитних деталей є те, що вона заснована на системі, відпрацьованій для з'єднань металевих деталей, та не враховує особливості поведінки композитів в зоні з'єднання, і тому не забезпечує належну якість розрахунків механічних з'єднань з ПКМ [1], що компенсується введенням завищених значень коефіцієнтів запасу міцності. Це призводить до перевитрат дорогого матеріалу та збільшення маси виробів з композитного матеріалу.

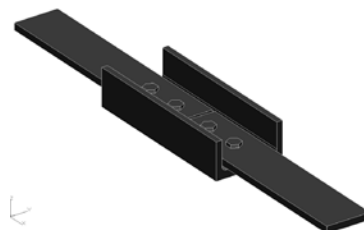
Метод скінчених елементів (МСЕ) дозволяє уточнювати розрахункові моделі. А саме: переходити до контактних моделей з пошаровим моделюванням ПКМ різних структур в зонах отворів, з урахуванням тертя, можливих зазорів при постановці болтів в отвори, зусилля затягування болтового з'єднання, температурних деформацій, розшарувань, відколів та інших технологічних дефектів, що допускаються [2-5].

### Зразок для дослідження:

Було розглянуто однозрізне БЗ, яке набагато виразніше виявляє особливості напружено-деформованого стану в болті і околі отворів в композиті ніж двозрізне БЗ [6]. Зразок такого однозрізного дворядного БЗ з ПКМ (рис.1) використовувався для випробування на втому.

Зразок містить дві пластини із ПКМ, які з'єднані із швелером з алюмінієвого сплаву Д16АТ болтами з титанового сплаву.

Пластини ПКМ скомпоновані з 24-х шарів. Шари з вуглецевої стрічки УОЛ-300-1А номінальною товщиною 0.235 мм в ПКМ укладені під кутами  $0^{\circ}$  та  $90^{\circ}$  відносно поздовжньої осі пластини, а з вуглецевої тканини УТ-900-



**Рис. 1.** Повна геометрична модель зразка для випробування на втому болтового з'єднання з ПКМ

3А номінальною товщиною 0.220 мм - під кутами  $\pm 45^\circ$ .

#### Мета досліджень.

Виявити вплив структури ПКМ та вигину болта на контактні напруження та запропонувати спосіб перевірного розрахунку на зминання контактних поверхонь отворів пластин з ПКМ.

#### Метод дослідження.

В роботі [14] обґрунтовано, а у [7] розроблено й реалізовано в програмному комплексі FEMAP/Nastran (метод скінченних елементів – МСЕ) змішану 3D-модель розрахунку характеристик НДС зразка для випробування на втому болтового з'єднання з ПКМ (рис.1), а саме: у зонах отворів створювали 3D скінчено-елементні моделі ПКМ для кожного шару ПКМ, а на деякій відстані – переходили до усередненого (згідно з теорією "ефективного модуля") моделювання пружних властивостей пластини з ПКМ, який розглядається як 3D-ортотропний матеріал. Моделювали шість структур: базову ПКМ-0 (реальну), і ще п'ять – модельних (табл.4 в [8]). Деякі результати розрахунків зразка БЗ представлені в [9 ... 12]. Найбільш контрастними за результатами виявилися дві структури: ПКМ-0 [-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]s та ПКМ-III [-45/45/90/-45/45/90/45/0/-45/0/90/0]s.

#### Інженерний варіант розрахунку композитного матеріалу на зминання.

Розрахунок на зминання контактної поверхні отворів в пластині з ПКМ можна проводити за класичною формулою [7], в яку додатково введена функція впливу кількох параметрів:

$$\frac{N_i}{h_i d_i} \cdot F(q_1, q_2, \dots) \leq [\sigma]_{CM}; \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

де  $N_i$  - сумарне зусилля, яке сприймається  $i$ -м отвором (болтом);  $h_i$  - товщина пластини біля  $i$ -го отвору;  $d_i$  - номінальний діаметр  $i$ -го отвору;  $F(q_1, q_2, \dots)$  - функція, що враховує вплив параметрів БЗ: структури ПКМ, вигину болта;  $[\sigma]_{CM}$  - довідкове допустиме напруження на зминання найбільш навантаженого шару матеріалу пластини з ПКМ.

#### Знаходження зусиль, які сприймаються поверхнями отворів

В [9] отримали, що приблизно (20-30)% зусилля, прикладеного до зразка, сприймалися силою тертя між поверхнями пластини з ПКМ і швелера і не передавалися через контакти в отворах. У зв'язку з цим можна ввести коефіцієнт  $\chi < 1$ , що визначає частину сили  $N_x$ , що сприймається болтами, тоді

$$N_1 + N_2 = \chi N_x$$

З [9] відомо, що середні (в "зрізних" перетинах болтів) дотичні напруження мають слабку залежність від зазорів і структури. Сили, які сприймаються болтами (і отворами), можна підрахувати за формулою

$$N_i = (\tau_{xz})_m \cdot A_i; \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

де  $A_i = \pi d_i^2 / 4$  – площі поперечних перерізів кожного болту. Позначим  $N_1 / N_2 = k$ . Тепер сили, які сприймаються отворами, матимуть вирази

$$N_1 = \omega \chi N_x; \quad N_2 = (1 - \omega) \chi N_x, \quad (3)$$

де коефіцієнт

$$\omega = k / (1 + k)$$

#### Сприйняття шарами ПКМ контактної тиску в отворах.

Величини  $(p)_i = N_i / (h_i d_i)$  у формулі (1) фактично є приведеними (усередненими) значеннями контактної тиску в проекції профілю отвору на площадку, перпендикулярну напрямку дії сили ( $h_i d_i$  - діаметральна площа частини болта у отворі ПКМ). Якби матеріал пластини був ізотропним, то саме  $(p)_i$  порівнювали б із значенням  $[\sigma]_{CM}$ . Для пластин з композитного матеріалу цього робити не можна, оскільки розподіл контактної тиску по складній поверхні контакту ПКМ із бічною поверхнею болту нерівномірний (рис.2) [9].

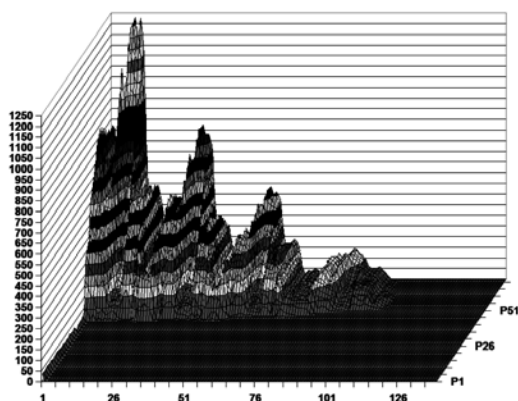


Рис.2 Графік контактних тисків, МПа, на поверхні першого отвору в зразку болтового з'єднання з  $\delta=20$  мкм, ПКМ-0

Максимуми відповідають шарам з укладанням уздовж дії сили  $N_i$ , тобто з кутом укладання  $0^0$ , а мінімуми - поперечно розташованим шарам (з кутом укладання  $90^0$ ). Якщо болт матиме жорсткість бічної поверхні не меншу ніж у шарів ПКМ з кутом укладання  $0^0$ , то саме ці шари будуть зминатися першими.

Оцінимо частку від загального зусилля, сприйняту шарами з кутом укладання  $0^0$ . Припустимо, що ця частка дорівнює частці в ефективному модулі Юнга, що припадає на шар. Skorистаємося формулою Фойгта, яка застосовується для підрахунку еквівалентних пружних модулів односпрямованого композиту і дає верхню оцінку [13]:

$$E_{ef} = \left( \sum V_i h_i E_i \right) / h_{\Sigma}, \quad (4)$$

де  $V_i$  – вагова частина  $i$ -го шару в однонапрявленому композиті;  $E_i$  – модуль пружності;  $h_i$  – номінальна товщина шару;  $h_{\Sigma}$  – сумарна товщина шарів.

Для характерної підструктури композиту [ 45/0/-45/90 ] формулу (4) можна переписати як

$$(E_{11})_{ef} = [h_L(E_{11})_0 + h_L(E_{22})_{90} + \lambda 2h_T(E_{11})_{\pm 45}] / h_{\Sigma}, \quad (5)$$

де коефіцієнт приведення  $\lambda$  при відомому значенні  $(E_{11})_{ef}$  дозволяє перерахувати вклад модулів пружності шару, укладеного під кутами  $\pm 45^0$  до основного напрямку.

$$\lambda = \frac{h_{\Sigma}(E_{11})_{ef} - h_L((E_{11})_0 + (E_{22})_{90})}{2h_T(E_{11})_{\pm 45}}$$

З (5) маємо формули для оцінки відносних вкладів шарів з різними кутами укладання в опір деформації в основному напрямку ( $0^0$ ):

$$\eta_0 = h_L((E_{11})_0) / (h_{\Sigma}(E_{11})_{ef}); \quad \eta_{90} = h_L((E_{22})_{90}) / (h_{\Sigma}(E_{11})_{ef}); \quad \eta_{\pm 45} = \lambda 2h_T(E_{11})_{\pm 45} / (h_{\Sigma}(E_{11})_{ef}). \quad (6)$$

Використовуючи значення модулів з таблиці 1 і таблиці 2 (табл.3 і табл.6 [8]),

Таблиця 1

**Пружні характеристики матеріалів окремих шарів**

Матеріал (рос.)	Модулі Юнга, МПа			Модулі зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона		
	$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$\mu_{13}$
УОЛ-300-1А	150000	8000	8000	4400	2700	4400	0.29	0.48	0.29
УТ-900-3А	80000	80000	8500	6000	4800	4800	0.40	0.32	0.32

Таблиця 2

**Значення "ефективних модулів" ПКМ**

Структура ПКМ	Модулі Юнга, МПа			Модулі зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона		
	$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$\mu_{13}$
5 варіантів структури ПКМ	62960	62960	9200	16490	3900	3900	0.414	0.290	0.290

отримаємо, що  $\lambda \approx 0.5865$ , та (в числах)

$$(E_{11})_{ef} = 38736 + 2066 + 22158 = (0.615252 + 0.032813 + 0.351935) \cdot 62960 = 62960.$$

Відносні вклади шарів в опір деформуванню в основному напрямку  $0^0$ :

$$\eta_0 = 38736 / 62960 \approx 0.6153 \quad \eta_{90} \approx 0.0328 \quad \eta_{\pm 45} \approx 0.3519$$

Характерна підструктура композита [45/0/-45/90] має 4 шари. Поділимо на  $w=1/4=0.25$  значення  $\eta_0$ ,  $\eta_{90}$  и  $\eta_{\pm 45}$ , отримаємо, у скільки разів зміниться величина розрахункового середнього тиску  $((p_x)_i)_m = N_i / (h_i d_i)$  при перерахунку на шар:

$$\text{у } \beta_0 = \eta_0 / w \approx 2.461, \beta_{90} = \eta_{90} / w \approx 0.1313 \text{ та } \beta_{\pm 45} = \eta_{\pm 45} / w \approx 1.408 \text{ разів.}$$

Коефіцієнт  $\beta_0$  характеризує вплив структури ПКМ на перерозподіл контактних тисків, що виникають від сили  $N_i$ .

Оскільки  $\beta_0 > 1$ , то для найбільш навантаженого шару параметр  $q_1 = \beta_0$  і

$$\text{функція впливу } F(q_1, q_2, \dots) = \beta_0 \cdot f_q(q_2, q_3, \dots) \quad (7)$$

### Максимальні рівні контактних напружень

Вигин болта формує різні рівні контактних напружень, які сприймаються шарами з кутом укладання  $0^0$  (див. рис.2). З результатів розрахунку для структур ПКМ-0 і ПКМ-III склали таблицю (таб.3) значень цих напружень.  $Z$  - координата серединної площини шару, відрахована від серединної площини пластини з ПКМ.

Таблиця 3

### Максимальні значення контактних тисків у шарах з кутом укладки $0^0$ , МПа

Варіант структури	Z, мм	Зазор $\delta$ , мкм. Отвір 1				Зазор $\delta$ , мкм. Отвір 2			
		0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	2.284	0	0	0	0	-	0	3	0
	1.414	0	0	0	0	93	51	55	0
	0.544	148	129	119	120	176	172	180	165
	-0.544	371	356	370	381	337	346	359	412
	-1.414	608	629	655	672	465	544	594	658
	-2.284	963	1053	1133	1148	777	867	962	1093
ПКМ-III	0.979	67	35	39	17	161	116	101	68
	0.544	117	105	106	117	151	155	148	158
	0.109	185	173	178	204	203	206	205	220
	-0.109	217	219	226	260	214	235	239	254
	-0.544	338	325	327	363	309	327	332	354
	-0.979	552	548	553	613	464	506	507	546

На основі даних таблиці для цих двох структур підраховали середні значення  $(p_m)_i$  від максимальних значень контактних тисків  $p_{max}$  в шарах з кутом укладання  $0^0$ , усереднену згинальну складову  $(p_u)_i$ , а також коефіцієнти вигину  $(k_u)_i$ :

$$(p_m)_i = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 (p_{max})_n; \quad (p_u)_i = 0.5(p_{max} - p_{min}); \quad (k_u)_i = (p_u)_i / (p_m)_i; \quad i=1,2 \quad (8)$$

$p_{max}$  і  $p_{min}$  - максимальні і мінімальні значення із стовпців таблиці 3.

Результати розрахунків помістили в таблицю 4.

Таблиця 4

### Середні значення (від максимальних) контактних тисків у шарах з кутом укладання $0^0$ , МПа; коефіцієнти згину

Структура	Характеристика	Отвір 1. Зазор $\delta$ , мм				Отвір 2. Зазор $\delta$ , мм			
		0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ-0	$p_m$ , МПа	348	361	380	387	308	330	359	388
	$k_u$	1.38	1.46	1.49	1.48	1.26	1.31	1.34	1.41
ПКМ-III	$p_m$ , МПа	246	234	238	262	250	258	255	267
	$k_u$	0.99	1.10	1.08	1.14	0.61	0.76	0.80	0.90

Структура ПКМ-III серед усіх розглянутих має найменший коефіцієнт вигину. Крім того, вона має і менші рівні середнього тиску на шари з кутом укладання  $0^0$ . Це - результат зміщення шарів з кутом укладання  $0^0$  до серединної площини пластини.

Множником  $(1+k_u)$  вводимо ще один параметр функції впливу, тобто  $q_2 = k_u$  і

$$\text{отримали її у вигляді } F(q_1, q_2, \dots) = \beta_0 \cdot (1 + k_u) \cdot f_q(q_3, q_4, \dots) \quad (9)$$

Отже, розрахунок на зминання контактної поверхні отворів в пластині з ПКМ можна проводити за класичною формулою,

$$\frac{N_i}{h_i d_i} \cdot F(q_1, q_2, \dots) \leq [\sigma]_{CM}; \quad i = 1, 2,$$

в яку додатково введена функція впливу:  $F(q_1, q_2, \dots) = \beta_0 \cdot (1 + k_u) \cdot f_q(q_3, q_4, \dots)$ ,

у якій коефіцієнт  $\beta_0$  характеризує вплив структури ПКМ на перерозподіл контактних тисків, а множник  $(1 + k_u)$  - згинання болта. Сили, що сприймаються болтами  $N_1$  та  $N_2$  з урахуванням сили тертя між елементами БЗ, знаходяться з виразів (2) та (3).

Уточнений вид функції впливу необхідно отримувати в додаткових дослідженнях (натурних або чисельних), що дозволить створити базу даних для величин цієї функції для актуальних в галузі варіантів силових болтових з'єднань з композитами.

### Список літератури:

1. 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.
2. Kelly, G. and Hallström, S. (2004), "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance", Composites. Part B: Engineering, no. 35, pp. 331-343.
3. Kelly, G. (2006), "Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints". Composite Structures, no. 72, pp. 119-129.
4. Ekh, Johan, Schön, Joakim and Melin, Gunnar (2005), "Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints", Composites. Part B: Engineering, no. 36, pp. 195-208.
5. Рудаков К.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NASTRAN / К.Н. Рудаков, С.Н. Шукаев // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", сер. Машинобудування №67. – 2013. – С. 199-206.
6. Rudakov K. Finite element analysis of the effect of technological factors on the strength of composite bolted joints / K. Rudakov, S. Shukaev, G. Krivov, V. Matvienko // Mechanotronic Systems and Materials 2014. Selected Papers. Opole University of Technology 2015, pp.103-108.
7. Василевский Е.Т. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов / Е.Т. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2010. – № 47. – С. 42-52.
8. Дифучин Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 1. Створення змішаних 3D-моделей / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2016. №2(77). С. 100-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.76975>.
9. Дифучин Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 2. Вплив зазорів і структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану болтів / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2016. – №3(78). – С. 132-145. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.87475>.
10. Рудаков К.М. Вплив структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану в околі отворів болтових з'єднань з ПКМ / К.М. Рудаков, Ю.М. Дифучин // Технологические системы, 2016. – №4(77). – С. 28-40.
11. Dyfuchyn, Y. and Rudakov, K. (2017), "Numerical Modelling of Bolted Composite Joints. Bolts Rigidity Effect on Normal Stresses in the Composite Layers", Mechanics and Advanced Technologies, no. 1(79), pp. 19-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95756>.
12. Дифучин Ю.М. Анализ разрывных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в зонах отверстий в пластинах с ПКМ образца болтового соединения / Ю.М. Дифучин, К.Н. Рудаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2017. – 3(91). – С. 47-60.
13. Болотин В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
14. Рудаков К.М. Чисельне обґрунтування застосування змішаних 3D-моделей ПКМ при розрахунках болтових з'єднань / К.М. Рудаков, А.С. Шандура // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2015. – №2(74). – С. 67-76.