

УДК 519.6, 539.3

Рудаков К. М., Дифучин Ю. М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Україна, м. Київ

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ПКМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ОКОЛІ ОТВОРІВ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ З ПКМ

У сучасних скінченно-елементних програмах класу PLM є можливість створювати змішані скінченно-елементні моделі шляхом “склеювання”. Це дозволяє, зокрема, створювати для розрахунків на ПЕОМ відносно невеликі 3D-моделі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) в болтових з'єднаннях, в яких ПКМ в зонах отворів моделюється пошарово (локально), а за ними – наближено, згідно з теорією “ефективного модуля” (глобально).

Мета роботи: виявлення тенденцій у змінах характеристик НДС у ПКМ у зонах отворів при зміні структури ПКМ, задля знаходження структур зі зниженими значеннями характеристик НДС, що визначають міцність з'єднання.

Обчислено 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 та сила, що розтягує зразок. За результатами розрахунків визначені розподіли напружень в ПКМ (рисунок, графіки). Зроблено висновки, що структура пластини з ПКМ суттєво впливає на характеристики НДС у зонах отворів; що можна знайти таку структуру, яка забезпечить підвищення міцності з'єднання.

Ключові слова: чисельне 3D-моделювання; ПКМ; болтове з'єднання; змішана 3D-модель ПКМ; МСЕ.

Вступ

Переважна кількість роз'ємних з'єднань з композиційними матеріалами (КМ) є болтовими. Силкові болтові з'єднання потрібно розраховувати на міцність. Оскільки вони характеризуються значною кількістю конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів, а механічні властивості та характеристики міцності КМ значно відрізняються від аналогічних для металів, то виникає проблема детального вивчення болтових з'єднань з КМ, зокрема, й із застосуванням моделювання на ЕОМ методом скінченних елементів (МСЕ).

Кінцевою метою таких розрахунків є кількісна оцінка впливу декількох конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на статичну й циклічну міцність з'єднання.

Постановка задачі

Мета роботи: виявлення тенденцій у змінах характеристик НДС у ПКМ у зонах отворів при зміні структури ПКМ, задля знаходження структур зі зниженими значеннями характеристик НДС, що визначають міцність з'єднання.

Для цього потрібно провести аналіз результатів проведених чисельних розрахунків уточнених МСЕ 3D-моделей зразків болтових з'єднань із ПКМ, в яких змінювалися структура ПКМ та основний технологічний фактор, що впливає на характеристики НДС – зазор між бічною поверхнею болта та отвору.

Огляд робіт, актуальність

Є значна кількість робіт, в яких болтові з'єднання з КМ моделюються із застосуванням МСЕ, наприклад, [1-6]. Але зазвичай це робиться дуже наближено, а технологічні фактори ігноруються.

У роботах [7, 8] розроблені й реалізовані в програмному комплексі FEMAP/Nastran тривимірні моделі для МСЕ розрахунків характеристик напружено-деформованого стану (НДС) болтового з'єднання з полімерними КМ (ПКМ). Розглядали ПКМ як 3D-ортотропний матеріал з “ефективними модулями”; враховували величини натягу/зазору при установці болтів в отвори, попереднього затягування болтів, зміни температури елементів з'єднання, тертя в з'єднанні, наявність припустимих відхилень виконання отворів у ПКМ, контактний характер взаємодій між елементами з'єднання тощо.

Але ПКМ фактично є конструкцією, яка створюється “під заказ” із окремих шарів, які в різних напрямках мають різні механічні характеристики (модулі пружності, границі міцності тощо). Тому, хоча би в зонах отворів під болти бажано мати модель, яка враховує цю обставину. При спробі це

зробити виникає проблема обмежених ресурсів ПЕОМ, що не дозволяє дуже докладно моделювати шари в усьому розрахунковому об'єкті. У роботі [9] було запропоновано використовувати змішані моделі: в зонах отворів створювати 3D скінченно-елементні моделі ПКМ для кожного шару ПКМ (локальні), а на деякій відстані – переходити до усередненого моделювання пружних властивостей пластини з ПКМ (глобальні). У роботі [10] були встановлені критичні розміри зон з пошаровим (локальним) моделюванням навколо отворів в ПКМ. Було виявлено, що відстань від отворів, на якій можна проводити “склеювання” локальної моделі ПКМ з глобальною, майже не вносячи погрішностей в розв'язок напруженого стану ПКМ в зоні отворів, можна обирати за формулою $s \geq (0,8 + 1,2)h$, де h – товщина пластини з ПКМ. Ця відстань незначно залежить від величин бічних зазорів δ болт/отвір (при збільшенні δ потрібні більші s).

Такі моделі дозволяють знаходити характеристики НДС елементів з'єднання з досить великою точністю, тобто створювати умови для отримання уточнених оцінок ресурсу конструкції при статичному та циклічному силовому навантаженню болтового з'єднання, що дуже важливо, наприклад, для сучасних літаків.

З результатів уточнених розрахунках болтових з'єднань з ПКМ встановлено, що деякі уявлення про “роботу” з'єднання, перенесені на ПКМ з металів, є неточними або навіть хибними. Зокрема, в роботі [11] виявлено, що в отворі завжди з'являється клиновидний зазор між бічною поверхнею болта та отвором (причина: болт однозрізного болтового з'єднання завжди “працює” не тільки на зріз, а й на згин), а контактна взаємодія бічної поверхні болта із кромками отворів викликає в зонах контактів у болті додаткові від'ємні осьові напруження пікового характеру. Навіть при знакопостійному циклі основного навантаження в болті може виникнути приповерхня зона зі циклічно знакозмінними осьовими напруженнями, що приведе до зміни характеру втомного руйнування болтів: відривом замість зрізанням.

Отже, проблема докладного вивчення поведінки силових болтових з'єднань з ПКМ є актуальною.

Скінченно-елементні моделі

Для досягнення мети провели чисельні експерименти, причому на моделях однозрізних дворядних зразків болтових з'єднань із ПКМ (рис.1), оскільки в однозрізних болтових з'єднаннях спостерігається більш значний вигин болтів і пластин, ніж у двозрізних, що призводить до більшої неоднорідності у характеристиках НДС з'єднання, тобто створюються більш жорсткі умови деформування болтового з'єднання ПКМ, сильніше виявляються тенденції

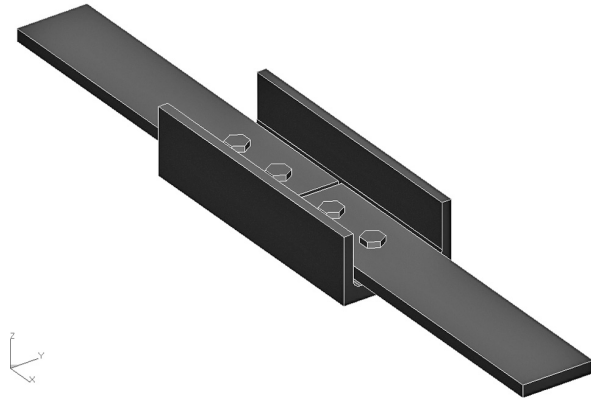


Рис. 1. Повна геометрична модель зразка для випробування на втому болтового з'єднання з ПКМ

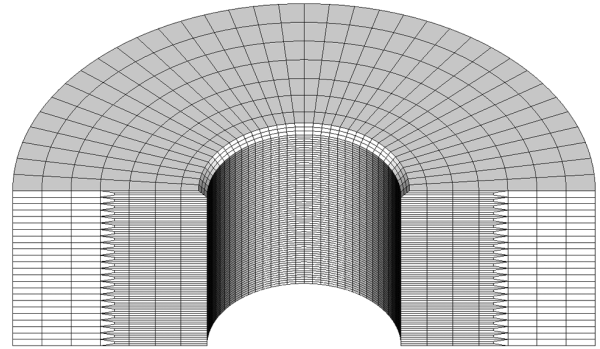


Рис. 2. Скінченно-елементна сітка навколо отвору в пластині з ПКМ

залежності у змінах характеристик НДС ПКМ у зонах отворів при зміні структури ПКМ.

Далі будемо замість слів “зразок для випробування болтового з'єднання з ПКМ” використовувати лише одне слово “зразок”.

Докладні відомості про створені змішані 3D-моделі зразка наведені в роботі [12], причому в ній основну увагу зосередили на обґрунтуванні усереднених пружних характеристик ПКМ.

Змодельовали шість структур (з 24-х шарів) ПКМ у з'єднанні, які позначили як ПКМ-0, ..., ПКМ-V (повторюємо табл. 4 з [12]).

Для спрощення розрахунків гайку з різьбою замінили нижньою голівкою “болта”. Але це не завадить досягнення мети даної роботи. Скінченно-елементна модель кожного болта мала приблизно 30 тисяч скінченних елементів типу TETRA Parabolic та 80 тис. вузлів.

Таблиця

Змодельовані структури ПКМ

Варіант	Структура
ПКМ-0	[-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]s
ПКМ-I	[-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0]s
ПКМ-II	[-45/90/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/0]s
ПКМ-III	[-45/45/90/-45/45/90/45/0/-45/0/90/0]s
ПКМ-IV	[-45/90/45/90/-45/90/45/0/-45/0/45/0]s
ПКМ-V	[-45/90/45/90/-45/90/45/0/-45/45/0/0]s

Зокрема, разок містить дві пластини із ПКМ, які з'єднані болтами зі швелером з алюмінієвого сплаву Д16АТ. Пластини ПКМ – з 24-х шарів, скомпонованих з вуглецевої стрічки (рос.) УОЛ-300-1А і ткани УТ-900-3А із сполучним матеріалом (рос.) ЭДТ-69н.

Створили моделі зразка з такими величинами бічного зазору болт/отвір δ : 0, 10, 20 і 70 мкм на діаметр 5 мм. Зазор створювали зменшенням діаметра болта (рис. 2-а у [12]).

Затягування пакета моделювали зменшенням відстані між голівками болта на величину $\Delta=0.08$ мм (рис. 2-б у [12]).

Навколо отворів пластину з ПКМ наближували пошарово, по три скінченних елемента на шар (рис. 2). Всі 24 створені скінченно-елементні моделі зразка мали приблизно по 88 тис. СЕ й по 280 тис. вузлів.

У цьому повідомленні проведено аналіз отриманих результатів розрахунків, але не всіх, а тільки тих, що відносяться до ПКМ.

Результати розрахунків зразка

Спочатку визначилися зі значенням зусилля затягування в болтах: приблизно 4.5 КН. Для цього

провели додатковий розрахунок з призначенням зусиллям, що розтягує зразок, $N_x = 0$, перерахували осьове напруження в болті σ_z на зусилля затягування.

Далі, для скорочення, назвемо “анімацією” перегляд об’єкта розрахунку в zdeформованому стані з накладенням на початковий стан значно збільшених (на вказаний великий відсоток) деформацій. Саме з такою “анімацією” наведені зображення на рис. 3 та на рис. 4.

На рис. 3 видно, що пластина з ПКМ локально сильно деформувалася голівкою болта під дією сили затягування болта, причому діаметр отвору в

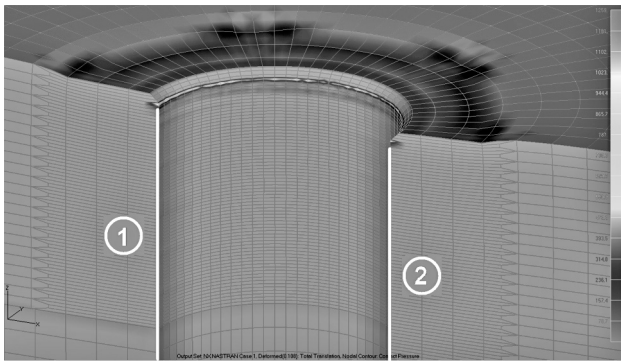


Рис. 3. Розподілені контактні зусилля ($N_x=0$, $\delta=0$ мкм, ПКМ-0, болт/отвір 1, “анімація”) в отворі пластини з ПКМ, МПа

пластині біля верхньої його частини внаслідок деформації намагався зменшитися, але боковий зазор був відсутній ($\delta=0$ мкм), тому на поверхні отвору біля верхньої його частини виникли контактні зусилля. При збільшенні зазору δ контактні зусилля біля верхньої частини отворів пластини з ПКМ, викликані затягуванням пакета, зникали.

На рис. 4 наведено характерний вигляд кольорового зображення розподілу напружень на поверхні розсічення елементів зразка площиною XZ при дії на зразок зусилля, що розтягує, величиною $N_x = 10$ КН. Зображення для кожного з проведених розрахунків – подібні.

Наведені зображення, по-перше, вказують на S – подібний характер деформування осей болтів в однорізному болтовому з’єднанні, причому вигинаються не тільки циліндричні частини болтів, а й голівки болтів перестають бути перпендикулярними до осі болтів. По-друге, навіть при відсутності початкового бічного зазору ($\delta=0$ мкм, рис. 4-а), з’являються клиноподібні бічні зазори. По-третє, при наявності початкового бічного зазору пластина з ПКМ і болти в отворах зміщуються в напрямку дії сили N_x і “вибираються” бічні зазори: в отворах пластини з ПКМ – ліві від болтів, а в отворах швелера – праві (на це вказує “анімація”: зображення болтів перекривають частини матеріалу пластини з

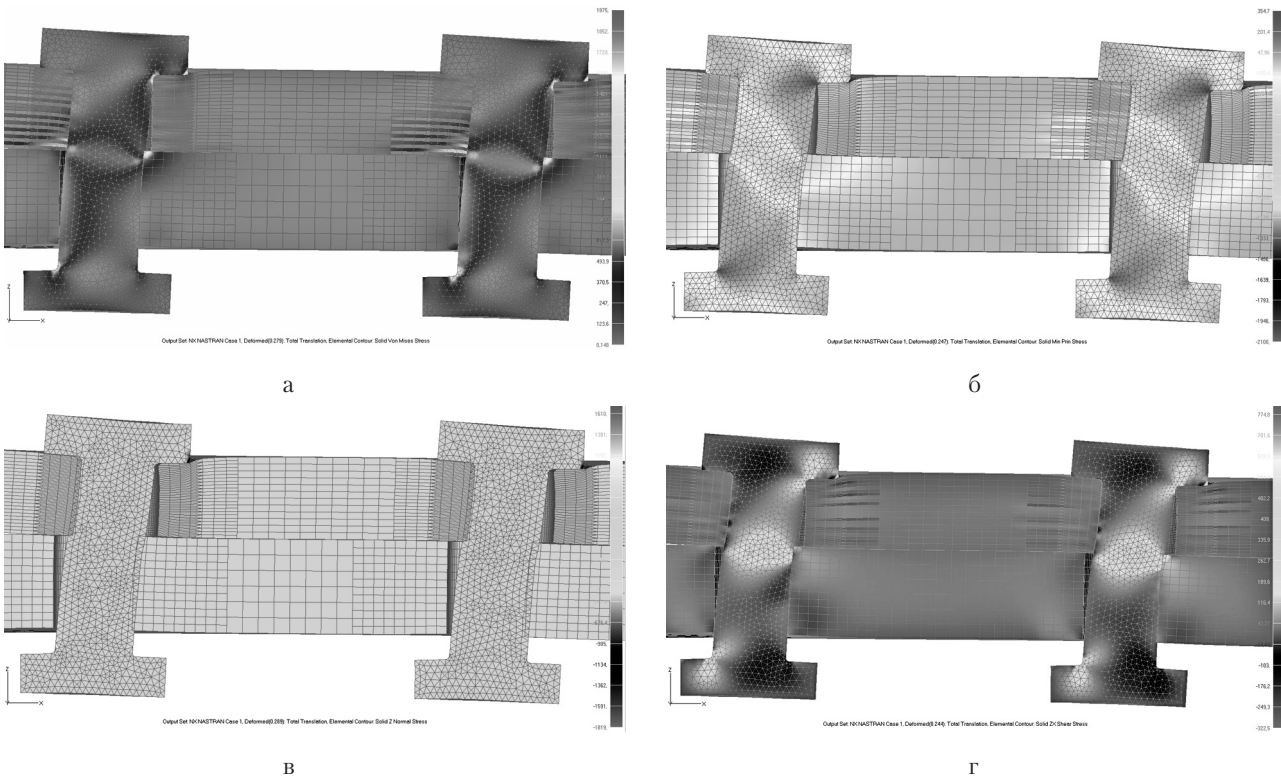


Рис. 4. Напруження, МПа, на поверхні розсічення зразка площиною XZ, “анімація”: а – σ_{Mizes} ($\delta=0$ мкм, ПКМ-0); б – σ_{min} ($\delta=20$ мкм, ПКМ-II); в – σ_z ($\delta=70$ мкм, ПКМ-III); г – τ_{zx} ($\delta=10$ мкм, ПКМ-V)

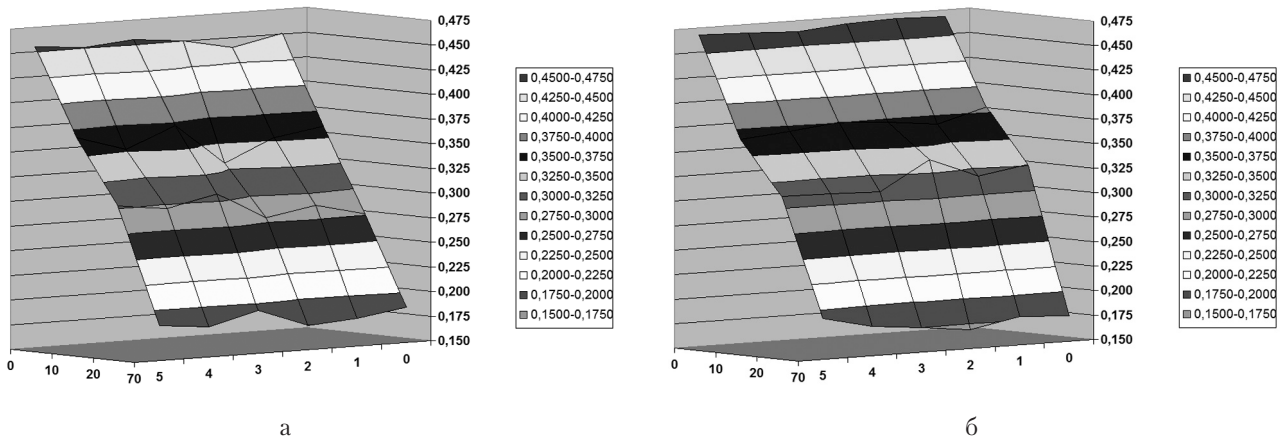


Рис. 5. Частка площі контактної поверхні від загальної площі отвору в ПКМ $\Delta_c = A_c/A$:
а – перший отвір; б – другий отвір (вісь 0...70 – бічні зазори δ , вісь 0...5 – структури ПКМ-0 ... ПКМ-V)

ПКМ і швелера). По-четверте, zdeформовані отвори перестають бути циліндричними.

Оскільки болт однозрізного болтового з'єднання завжди "працює" не тільки на зріз, а й на згин, в отворі завжди з'являється клиновидний зазор між бічною поверхнею болта та отвором ([11] та рис. 4), а поверхня отвору в ПКМ по-різному пручається контактному тиску, то поверхня контакту бічної поверхні болта з отвором є складною за обрисом і надає важливу інформацію щодо "некласичного" розподілу контактної тиску в отворах ПКМ.

Один з результатів розрахунків, що формується Femar, є величини контактної тиску у вузлах контактних поверхонь. Їх можна вивести у текстовий файл "під Excel" для призначеної множини вузлів. Це зробили для вузлів поверхонь отворів у пластини з ПКМ. Ще створили додаткову програму, яка перераховує координати вузлів циліндричної поверхні отвору на площину та одночасно створює плоску таблицю вузлових значень контактної тиску, а також підраховує декілька характеристик контактної поверхні.

Зокрема, на тривимірних графіках рис. 5 зображені гіперповерхні, які вказують на частку площі контактної поверхні A_c від загальної площі A отвору в ПКМ, тобто $\Delta_c = A_c/A$. Частка визначалася як відношення кількості поверхневих вузлів з ненульовим контактним тиском до загальної кількості вузлів на поверхні отвору в ПКМ.

Відзначимо, що точність розв'язку контактної задачі призначали в 1% для балансу внутрішніх та зовнішніх робіт. Але реальна точність, на якій закінчувалися ітерації, була дещо кращою, та, головне, завжди була різною для різних структур ПКМ та зазорів. До того ж розглянуті структури ПКМ не можна характеризувати монотонною функцією, хоча в них реалізовувалася тенденція до наближення шарів з нульовим кутом укладання до нейтральної поверхні пластини з ПКМ, яка при навантаженні вигинається. З цих двох причин на

рис. 5 немає повної гладкості поверхонь, але тенденції простежуються чітко.

Для в'яснення більш точного характеру зміни Δ_c від бічного зазору δ провели додаткові розрахунки зразка з проміжними величинами $\delta = 5, 30, 40, 50, 150$ й 250 мкм для структури ПКМ-0. Графіки зображені на рис. 6. Отримали монотонно-спадний нелінійний характер кривих, які для обох отворів розрізняються, але незначно (можливо, що останнє пов'язано зі збалансованою відносно розподілу зусиль, що припадають на болти, жорсткістю зразка). Вочевидь, що при подальшому збільшенні бічного зазору δ десь повинна проявитися асимптота.

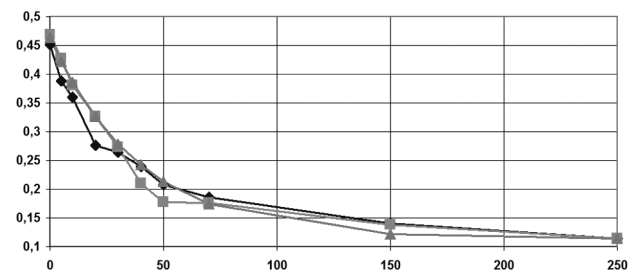


Рис. 6. Графіки залежності від бічного зазору δ частки площі контактної поверхні від загальної площі отвору в ПКМ $\Delta_c = A_c/A$, для структури ПКМ-0 (♦ – отвір 1; ■ – отвір 2, ▲ – апроксимація)

Але дуже великі бічні зазори не характерні для зрізних болтових з'єднань.

Для аналітичної апроксимації даних рис.6 застосували метод найменших квадратів, отримали таке наближення:

$$\Delta_c = a_c + b \times \exp(-c \times \delta),$$

де коефіцієнти $a = 0,1133, b = 0,35, c = 0,025$.

З цих графіків зробили такі висновки (діаметр отворів 5 мм та його відношення до товщини пластини з ПКМ $d/h \approx 1$):

- значення Δ_c практично не залежать від зміни структури ПКМ;

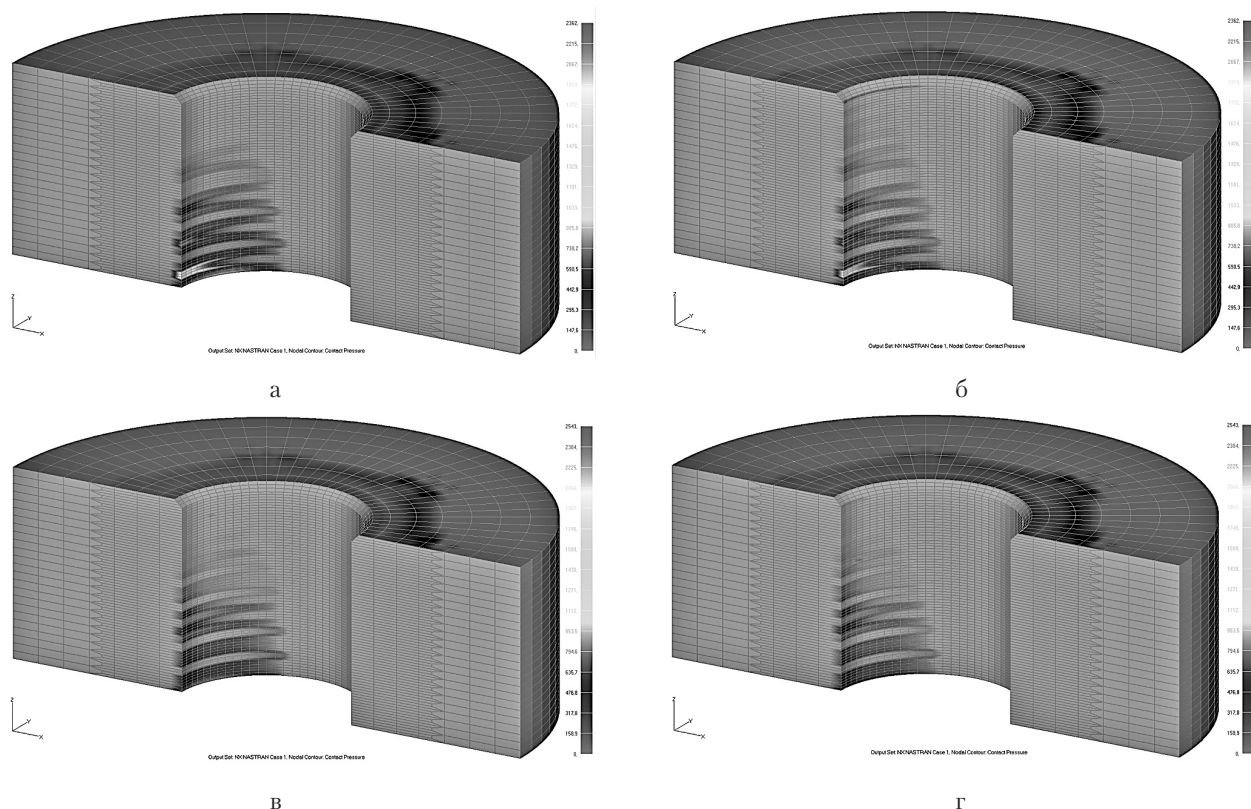


Рис. 7. Характерні обриси контактних поверхонь та рівні контактної розподіленої навантаження, МПа, на поверхнях отвору в зразку болтового з'єднання з ПКМ:

а, б – ПКМ-0, $\delta=20$ мкм, отвори 1 і 2; в, г – ПКМ-III, $\delta=20$ мкм, отвори 1 і 2

- зі збільшенням початкового бічного зазору в отворі ПКМ δ значення Δ_c систематично зменшуються.

Всі рис. 7 показують, що обриси поверхні контакту (темний колір) можна назвати “смугастими”, вона має змінну ширину, причому максимум її ширини спостерігається біля нижньої крайки отвору.

Ще з рис. 7 видно, що обриси контактних поверхонь залежать від структур ПКМ.

На рис. 7-а, б бачимо, що в зонах отворів найбільш напруженим шаром пластини зі структурою ПКМ-0 є другий шар – шар з кутом укладання 0 градусів (тобто вздовж лінії дії зовнішньої сили). Саме він може зруйнуватися (зам’ятися) першим при зростанні навантаження. В структурі ПКМ-III найближчий до поверхні пластини шар з кутом укладання 0 градусів “зсунутий” на восьму позицію.

На тривимірних графіках рис. 8 зображені гіперповерхні, які показують величини контактних розподілених зусиль на поверхні перших отворів у пластинах ПКМ в зразках зі структурами ПКМ-0 та ПКМ-III при бічному зазорі $\delta=20$ мкм. На рис. 8-а видно, що в отворі зі структурою ПКМ-0 шар з нульовим кутом укладання сприймає дуже великі зусилля порівняно з іншими. А для структури ПКМ-III (рис. 8-б) контраст значно менший.

Графіки на рис. 9, на яких осі ординат мають однакові діапазони значень, наочно показують залежність отриманих в розрахунках максимальних значень контактних розподілених зусиль на поверхні отворів в зразку від величини зазорів δ та структур.

На рис. 9-б при $\delta=0$ мкм, максимальні значення контактних розподілених зусиль поводяться неоднаково.

Причина виявилася з рис.10: у структурі ПКМ-0 максимум виникає в другому шарі, а у ПКМ-III – в предостанньому (на верхньому кінці лінії 1, що позначена на рис. 3, в лівій частині обох рис. 10). У поясненні до рис. 3 відзначалося, що внаслідок локального деформування при затягуванні болта при $\delta=0$ мкм на поверхні отвору біля верхньої його частини виникають контактні зусилля. Повертаючись до графіків рис. 9-б, бачимо, що для всіх структур, крім ПКМ-0, пікові значення цієї зони виявилися більшими, ніж в інших місцях.

Щодо першого отвору, в ньому такий ефект не спостерігався, напевно, внаслідок більшого його (та болта) навантаження від сили N_x .

Для з’ясування питання про відносну частку навантаження на болт (отвір) від сили N_x побудували усереднені значення контактних розподілених

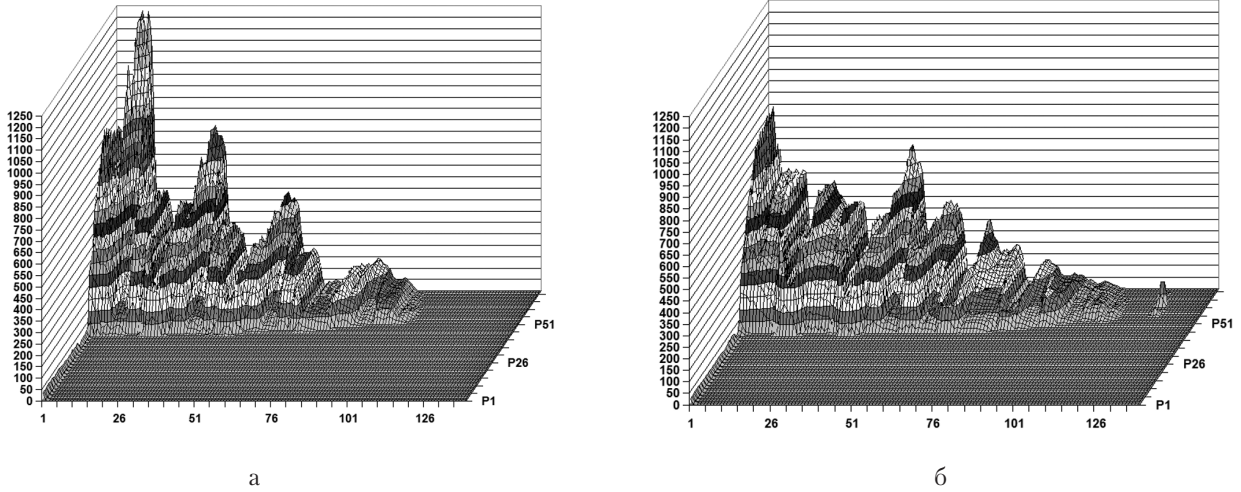


Рис. 8. Графіки контактних розподіленх зусиль, МПа, на поверхні першого отвору в зразку болтового з'єднання з $\delta=20$ мкм: а – ПКМ-0; б – ПКМ-III

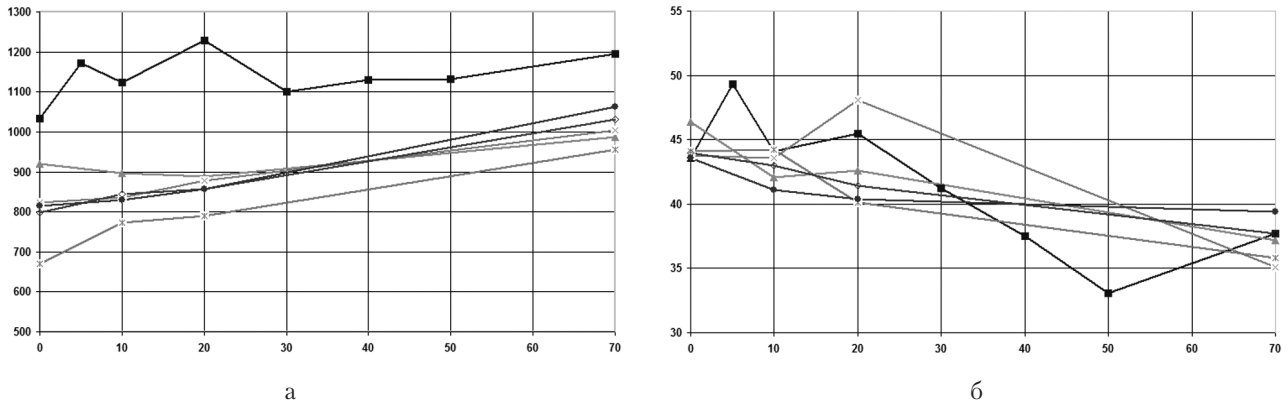


Рис. 9. Максимальні значення контактних розподіленх зусиль, МПа, на поверхні отворів в зразку болтового з'єднання з ПКМ: а – перший отвір; б – другий отвір (■ – ПКМ-0; ▲ – ПКМ-I; x – ПКМ-II; ж – ПКМ-III; ◆ – ПКМ-IV; ● – ПКМ-V)

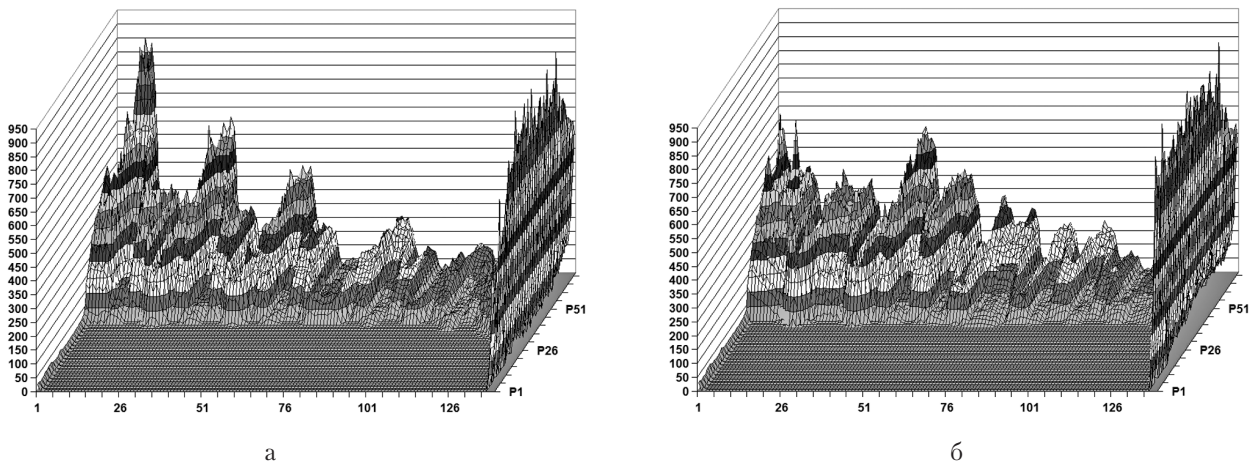


Рис. 10. Графіки контактних розподіленх зусиль, МПа, на поверхні другого отвору в зразку болтового з'єднання з $\delta=0$ мкм: а – ПКМ-0; б – ПКМ-III

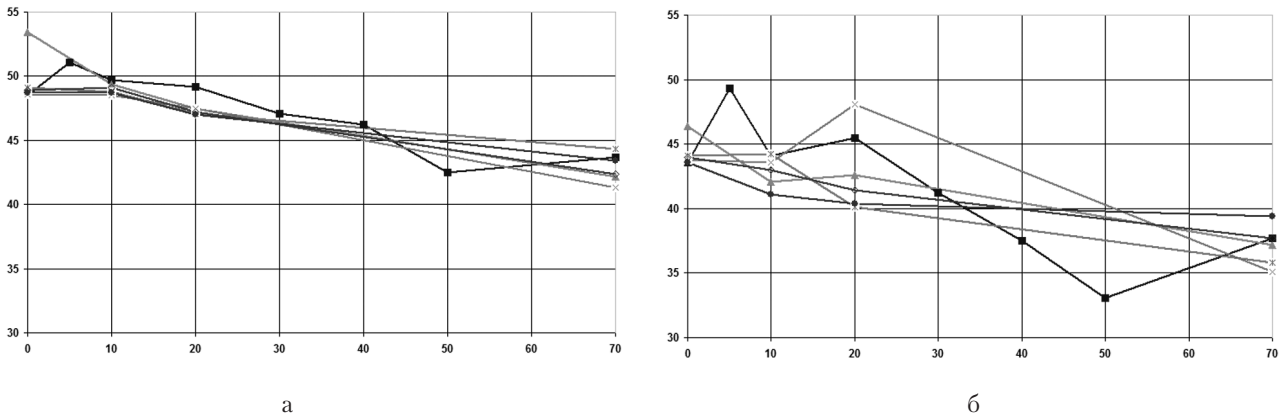


Рис. 11. Усреднені значення контактних розподілених зусиль, МПа, на поверхні отворів в зразку болтового з'єднання з ПКМ, в напрямку осі X: а – перший отвір; б – другий отвір (■ – ПКМ-0; ▲ – ПКМ-I; x – ПКМ-II; ж – ПКМ-III; ◆ – ПКМ-IV; ● – ПКМ-V)

зусиль в напрямках осі X (рис. 11) та Y (рис. 12). Ці значення обчислювали як середнє арифметичне значень у вузлах на всій бічній поверхні отвору.

Спадний характер графіків рис.11 вказує на той факт, що при збільшенні бічних зазорів δ до бічних поверхонь болтів та отворів “доходить” все менше навантаження, яке сприймається ними як контактне.

Співставлення даних графіків рис.11 виявило, що в напрямку осі X середнє значення відношень контактних розподілених зусиль при однакових величинах бічних зазорів δ , мало приблизне значення 1,13. Тобто перший болт (отвір) за рахунок контактних зусиль сприймає в $k \approx 1,13$ разів більшу частку навантаження N_x , ніж другий.

Спадний характер графіків рис. 12 вказує на той факт, що поверхні контакту при збільшенні бічних зазорів δ рівномірно звужуються.

Висновки з графіків рис .8 ... рис. 12:

- збільшення зазорів призводить до збільшення максимальних значень контактних розподілених зусиль на поверхні отворів;

- застосування структури ПКМ-0 (реальна) є таким, що викликає найбільші максимальні значення розподілених контактних зусиль на поверхні отворів. Найменші значення зафіксовані для структури ПКМ-III;

- підбором структури ПКМ можна зменшити максимальні значення розподілених контактних зусиль на поверхні отворів на чверть та майже вдвічі (структура ПКМ-III відносно структури ПКМ-0).

Про розрахунки ПКМ на міцність у зонах отворів

Відомо, що наявність зазору між болтом та отвором призводить до нерівномірності розподілу контактних напружень по поверхні отвору та до появи місцевих руйнувань композиційного матеріалу (зминання крайки, викришування матриці); що збільшення зазору посилює ці негативні прояви [13].

Все, що виявлено на поверхнях контакту болтів з бічними поверхнями отворів у ПКМ (обриси,

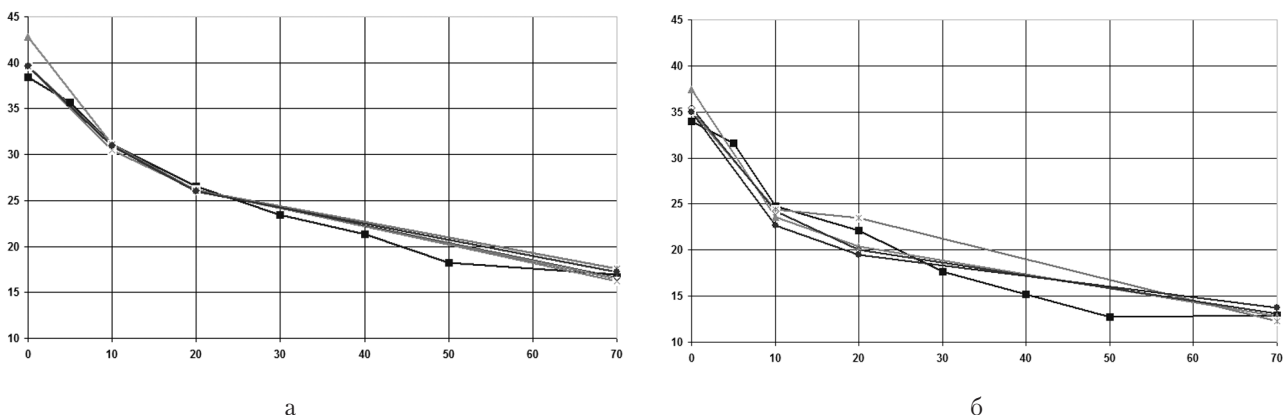
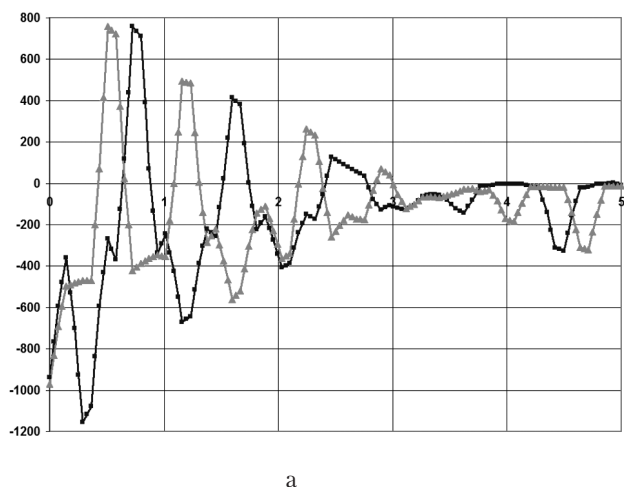


Рис. 12. Усреднені значення контактних розподілених зусиль, МПа, на поверхні отворів в зразку болтового з'єднання з ПКМ, в напрямку осі Y: а – перший отвір; б – другий отвір (■ – ПКМ-0; ▲ – ПКМ-I; x – ПКМ-II; ж – ПКМ-III; ◆ – ПКМ-IV; ● – ПКМ-V)

контактний тиск, пікові значення тощо – див. вище), потрібно враховувати в методиці розрахунку болтового з'єднання з ПКМ на міцність.

Відзначимо, що ефект вільної кромки [14] в отворах пластини з ПКМ докладно не аналізували. Відомо, що стягування пластини болтами з достатньо великими зусиллями зазвичай гарантує відсутність небезпечних значень напружень σ_x , які розтягують композицію в напрямку, перпендикулярному до площин укладання моношарів. А це призводить до значного підвищення втомної міцності болтового з'єднання [15]. Критерій розшарування Хашіна-Ротема, окрім цього напруження, ще враховує напруження зсуву τ_{yz} й τ_{zx} . Але й ці напруження в проведених розрахунках були незначними. Ще відзначимо, що графіки рис. 13 показують, наявність стрибків напружень, які є результатом розривів в значеннях напружень σ_x (рис. 13-а) та τ_{max} (рис. 13-б) в сусідніх шарах ПКМ. В структурі ПКМ-0 амплітуда розривів σ_x досягла майже 1200 МПа, а τ_{max} – майже 500 МПа, що дуже небезпечно. В структурі ПКМ-III розриви є, але їх амплітуди значно менші. Для інших зазорів, структур та другого отвору ситуація аналогічна.



структур ПКМ-0 і ПКМ-III. Зображення наявно показують, що розриви цих напружень дійсно є й великі, що в шарах з кутом укладання 90 градусів навіть стискальні контактні напруження не перевищують напружень розтягу, оскільки ці шари залишаються розтягнуті. Розтяг цих шарів виникає під дією зусилля затягування пакета та від зчеплення з сусідніми шарами внаслідок значних відмінностей в напрямках укладки та в пружних модулях (Юнга й коефіцієнтах Пуассона) застосованих моделей 3D-ортотропії матеріалів шарів (див. табл. 3 у [12]).

Стрічка УОЛ-300-1А має такі границі міцності на розтяг та стиск: не менш ніж 1,6 ГПа та 0,7 ГПа відповідно [16]. Саме цю стрічку укладено під кутами 0 й 90 градусів. Ткань вуглецева УТ-900-3А має приблизно в 1,5 разів меншу границю міцності на стиск, ніж на розтяг: приблизно 480 й 760 МПа по основі та вутку [16]. Ця тканина укладена в ПКМ під кутами ±45 градусів. Тобто для обох матеріалів стиск є більш небезпечним, ніж розтяг.

Для композиційних матеріалів розроблено декілька критеріїв статичної міцності: максимальних деформацій, максимальних напружень, Хілла, Цая-Хілла, Цая-Ву, Хашіна, Хоффмана,

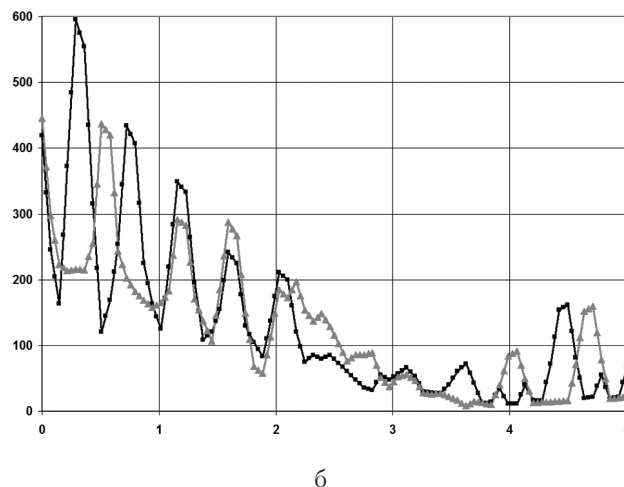


Рис. 13. Графіки напружень, МПа, вздовж лінії 1 (рис. 3) для першого отвору в ПКМ, $\delta=20$ мкм, (■ – ПКМ-0; ▲ – ПКМ-III): σ_x – (а), τ_{max} – (б)

Примітка. Для виводу значень напружень у Femap потрібно “конвертувати” напруження з точок чисельного інтегрування (усередині скінченних елементів, SE) у вузли скінченно-елементної сітки. При цьому значення у вузлах, що входять до декількох SE, усереднюються, тому на графіках рис. 13 фактично розривів напружень немає, а є дуже швидкі їх зміни. Оскільки в отворах по товщині моношарів застосували по три SE, то пікові значення збереглися й після “конвертування”.

На рис.14 зі значною “анімацією” показані зображення не “конвертованих” напружень σ_x в зонах контакту (зазор болт/отвір $\delta=0$ мкм) для

інші. Їх докладний огляд можна знайти в [17]. Для композиційних матеріалів в околі отворів рекомендують [18] критерій розшарування Ямада, який є фактично критерієм Цая-Ву [19], застосований для об'ємів матеріалу під поверхнею контакту на деякій відстані [20], що визначається за формулою, обґрунтованою для алюмінієвого сплаву. Але рис. 14 показує, що для ПКМ уявлення, що під поверхнею контакту обов'язково повинна бути зона всебічного стискання, не відповідає дійсності.

З аналізу критеріїв міцності композиційних матеріалів, а також означених вище властивостей

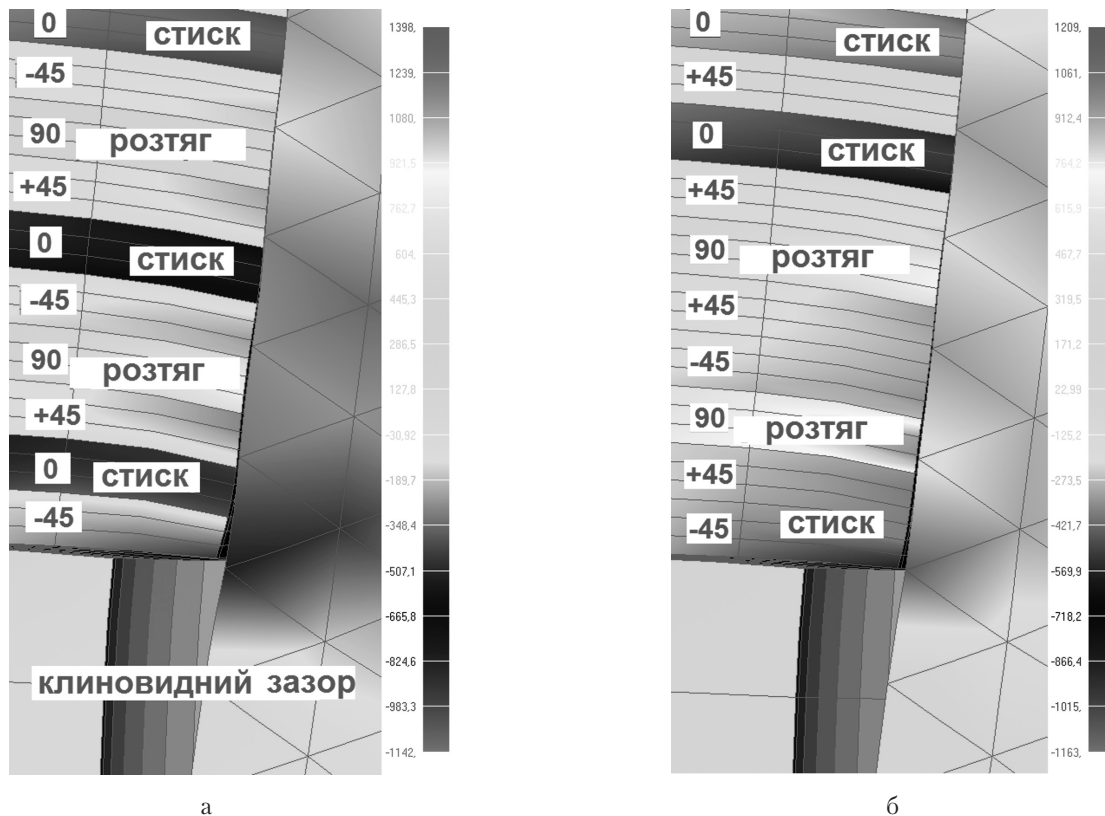


Рис. 12. Напруження σ_x , МПа, в ПКМ в зонах контакту, зазор болт/отвір 0 мкм: а – ПКМ-0; б – ПКМ-III

міцності композитних стрічок, можна зробити висновок, що в першу чергу потрібно аналізувати найбільші за модулем напруження стискання (критерій максимальних напружень, приблизно 23% застосування в практиці розрахунків [21]).

Висновки

За результатами моделювання можна сформулювати наступні основні висновки:

- шляхом чисельного моделювання виявлено декілька ефектів, які можуть значно вплинути на уявлення про характеристики напружено-деформованого стану пластин з ПКМ в зонах отворів;
- підбором структури ПКМ можна значно зменшити максимальні значення розподілених контактних зусиль на поверхні отворів у пластинах з ПКМ. Це досягається переміщенням моношарів з кутом укладання 0 градусів (відносно напрямку основного навантаження) вглиб пластини з ПКМ;
- з огляду на виявлені ефекти, класичні підходи з розрахунків одношарових болтових з'єднань з ПКМ на міцність потребують значного корегування. Основою таких корегувань повинні стати модельні чисельні розрахунки з'єднань в максимально наближеній щодо реальності постановці, які в наш час вже можливо реалізувати на ПЕОМ;

- цей напрямок досліджень потрібно продовжувати, оскільки кількість параметрів впливу значно більша, ніж розглянуто в цій та інших статтях.

Символьні позначення

- σ_x – нормальне напруження, що діє у напрямку осі x
- σ_z – нормальне напруження, що діє у напрямку осі z
- σ_{min} , σ_{max} – мінімальні та максимальні нормальні напруження
- σ_{Mises} – напруження за Мізесом
- τ_{yz} – дотичне напруження в напрямку осі z на площині з нормаллю по осі y
- τ_{zx} – дотичне напруження в напрямку осі x на площині з нормаллю по осі z
- τ_{max} – максимальне дотичне напруження
- N_x – сила, що розтягує болтове з'єднання у напрямку осі x

Література

- [1] Gordon Kelly, Stefan Hallström. Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance. – Composites. Part B: Engineering, 2004. – 35. – s. 331–343.

- [2] Johan Ekh, Joakim Schüz, Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints. – Composites. Part B: Engineering, 2005. – 36. – s. 195–208.
- [3] Gordon Kelly. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. Composite Structures, 2006. – 72. – s. 119–129.
- [4] Amit P. Wankhade, Kiran K. Jadhao. Design and Analysis of Bolted Joint in Composite Laminated. – J. of Modern Engineering Research (IJMER), 2014. – 4 (3). – s. 20–24.
- [5] Binqi Chen, Mingbo Tong, Yiding Wang, Fangli Wang. Numerical Analysis of Composite Bolted Joints using the Arlequin Method. – 3-rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015), s. 2051–2055.
- [6] Raju, Shruthi Salimath, Apoorv Kalra, Nithya Narayan, Abhishek Singh. Numerical analysis of metal-composite hybrid joint subjected to static loading. QuEST Born to Engineer. – Lightweight Technology, 2014. – 12 s.
- [7] 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.
- [8] Кривов Г. А. Моделирование болтовых соединений, содержащих детали из ПКМ, в среде FEMAP/NASTRAN / Г.А.Кривов, В.А. Матвиенко, А.Н. Рудько, К.Н. Рудаков, С.Н. Шукаев, С.П. Негода // Технологические системы, 2013. – №1(62). – С. 90-102. <http://technological-systems.com/images/journal/2013/files/ts62.pdf>
- [9] Кривов Г. А. Численные исследования напряженно-деформированного состояния высоконагруженных соединений элементов конструкций планера самолета / Г. А. Кривов, В.А. Матвиенко, А.Н. Рудько, Е.Т. Василевский, Г.Н. Романович, К. Н. Рудаков, С. Н. Шукаев, А. А. Добронравов // Технологические системы, 2013. – №4(65). – С. 7-16. <http://technologicalsystems.com/images/journal/2013/files/ts65.pdf>
- [10] 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.
- [11] Рудаков К.М. Про вплив величини зазору між болтом та отвором на напружений стан болта однорізного болтового з'єднання в зоні “зрізу” / К.М. Рудаков, О.А. Добронравов // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування, 2013. – №3(69). – С. 62–71.
- [12] 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.
- [13] Lawlor V.P., Stanley W.F., McCarthy M.A. Characterisation of damage development in single-shear bolted composite joints. Journal of Plastics, Rubber and Composites. The Institute of Materials, London, UK, 2002, Vol. 31, No. 3, pp. 126–133.
- [14] Межслойные эффекты в композитных материалах // Под ред. Н. Пейгано / Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 346 с.
- [15] Garbo S.P., Ogonowski J.M. Effect of Variances and Manufacturing Tolerances on the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints. Volume I – Methodology Development and Data Evaluation. McDonnell Douglas Corporation April 1981.
- [16] Кучер Н.К. Деформирование и прочность слоистых углепластиков при статическом термомеханическом нагружении / Н.К. Кучер, М.Н. Заразовский, Е.Л. Данильчук // Механика композитных материалов, 2012. – Т. 48, № 6. – С. 963–980.
- [17] Лепихин П.П. Методы и результаты анализа напряженно-деформированного состояния и прочности многослойных толстостенных анизотропных цилиндров при динамическом нагружении (обзор). Сообщение 3. Феноменологические критерии прочности / П.П. Лепихин, В.А. Ромащенко // Проблемы прочности, 2013. – № 3. – С.24–41.
- [18] 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 s.
- [19] Tsai S.W., Wu E.M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials // J. Compos. Mater. – 1971. – 5. – pp. 58-80.
- [20] Whitney J.M., Nuismer, R.J. Stress Fracture Criteria for Laminated Composite Containing Stress Concentrations. Journal of Composite Materials, Vol. 8, 1974, pp. 253–264.
- [21] Mechanics of composite structures / L.P. Kollar, G.S. Springer. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 480 p.

Rudakov K. N., Dyfuchyn Yu. N.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Ukraine, Kyiv

EFFECT OF THE PCM PLATE'S STRUCTURE ON THE CHARACTERISTICS OF THE STRESS-STRAIN STATE IN THE AREAS OF HOLES OF BOLTED JOINT WITH THE PCM

Abstract. *In modern finite element class PLM programs have the opportunity to create mixed finite element model by "gluing".*

It allows to create, in particular, for calculations on PC rather small 3D-models of polymeric composite materials (PCM) in bolt joints in which composite in zones of bolt-holes is body-sectional modelled, and behind them – approximately, according to the theory of "the effective module".

Objective: *to identify trends in the changes of stress-strained state characteristics in the PCM in the areas of the holes, depend of the changes of PCM structures, to find structures with reduced stress-strained state values characteristics that determine the strength of the connection.*

Created 24 of 3D-models of one shear two-row bolt joints with PCM (contact problem), which ranged PCM structure (6 options), as well as the backlash of bolts with holes (4 values).

The value of bolt tightening force and tensile force specimen were unchanged. According to the results of calculations to determine the distribution of minimum stress and contact pressure (tables, graphs).

It is concluded that the structure of a PCM plate significantly affects the characteristics of the stress-strain state of the PCM in the areas of holes; that we can find a structure that will ensure the lowest values of the absolute values of compression stress and a greater strength.

Keywords: *numerical 3D-modelling; composite; a bolt joint; mixed 3D-model composite; FEM.*

References

- [1] Gordon, Kelly and Stefan, Hallström (2004), "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance", Composites, Part B: Engineering, no. 35, pp. 331–343.
- [2] Johan, Ekh, Joakim, Schun, Gunnar, Melin (2005), "Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints", Composites, Part B: Engineering, no. 36, pp. 195–208.
- [3] Gordon, Kelly (2006), "Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints", Composite Structures, no. 72, pp. 119–129.
- [4] Amit P., Wankhade, Kiran and K. Jadhao (2014), "Design and Analysis of Bolted Joint in Composite Laminated", Journal of Modern Engineering Research (IJMER), no. 4 (3), pp. 20–24.
- [5] Binqi, Chen, Mingbo, Tong, Yiding, Wang and Fangli, Wang (2015), "Numerical Analysis of Composite Bolted Joints using the Arlequin Method", 3-rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015), pp. 2051–2055.
- [6] Raju, Shruthi, Salimath, Apoorv, Kalra, Nithya, Narayan and Abhishek Singh (2014), "Numerical analysis of metal-composite hybrid joint subjected to static loading", QuEST Born to Engineer, Lightweight Technology, 12 p.
- [7] Rudakov, K.N. and Shukaev, S.N. (2013), "Modelling of bolted connections from PCM in the program FEMAP/NX NASTRAN", Visn. Nats. tekhn. un-ta Ukrayiny "Kyiv. politekhn. in-t". Seriya mashynobuduvannya [Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], no. 67, pp. 199–206. (In Russian)
- [8] Krivov G. A., Matvienko V. A., Rudko A. N., Rudakov K. N., Shukayev S. N., Negoda S. P. Modeling of bolt joints contains composites parts using program complex FEMAP/NASTRAN // Technological systems, 2013 - #1(62). – P. 90-102. (In Russian) <http://technological-systems.com/images/journal/2013/files/ts62.pdf>
- [9] Krivov G. A., Matvienko V. A., Rudko A. N., Vasylevskyi E. T., Romanovich G. N., Rudakov K. N., Shukayev S. N., Dobronravov A. A. Numerical study of stress-strain state of high-loaded joints of airframe structural components // Technological systems, 2013 - #4(65). – P. 1-16 (In Russian) <http://technological-systems.com/images/journal/2013/files/ts65.pdf>
- [10] Rudakov, K.N. and Shandura, A.S. (2015), "Numerical Ground of Application of mixed 3D-Model Composites at Computations of Bolted Joints", Visn. Nats. tekhn. un-ta Ukrayiny "Kyiv. politekhn. in-t". Seriya mashynobuduvannya, no. 2(74), pp. 67–76. (In Ukrainian)

- [11] Rudakov, K.N. and Dobronravov, A.A. (2013), "About Influence of Size of a Backlash Between a Bolt and the Hole on the Tension Condition of a Bolt of the Single-Shear Bolted Joint in a "Shearing" Zone", *Visn. Nats. tekhn. un-ta Ukrayiny "Kyiv. politekhn. in-t". Seriya mashynobuduvannya*, no. 3(69), pp. 62–71. (In Ukrainian)
- [12] Dyfuchyn, Y.N. and Rudakov, K.N. (2016), "Numerical Modelling of Bolted Joints from Composite. The Message 1. Creation of the Mixed 3D-Models", *Visn. Nats. tekhn. un-ta Ukrayiny "Kyiv. politekhn. in-t". Seriya mashynobuduvannya*, no. 2(77), pp. 100–107. (In Ukrainian)
- [13] Lawlor, V.P., Stanley, W.F. and McCarthy, M.A. (2002), "Characterisation of damage development in single-shear bolted composite joints", *Journal of Plastics, Rubber and Composites. The Institute of Materials, London, UK*, vol. 31, no. 3, pp. 126–133.
- [14] Pejgano, N.J. (ed) (1993), "Mezhslojnye jeffekty v kompozitnyh materialah" [Interlaminar Response of Composite Materials], Translated by, Mir, Moscow, 346 p. (In Russian)
- [15] Garbo, S.P. and Ogonowski, J.M. (1981), "Effect of Variances and Manufacturing Tolerances on the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints. Volume I – Methodology Development and Data Evaluation". McDonnell Douglas Corporation.
- [16] Kucher, N.K., Zarazovskij, M.N. and Danil'chuk, E.L. (2012), "Deformirovanie i prochnost' sloistyh ugleplastikov pri staticheskom termomechanicheskom nagruzhennii" [Deformation and strength of laminated carbon-fiber-reinforced plastics under a static thermomechanical loading], *Mehanika kompozitnyh materialov*, vol. 48, no. 6, pp. 963–980. (In Russian)
- [17] Lepihin P.P. *Metody i rezul'taty analiza naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija i prochnosti mnogoslojnyh tolstostennyh anizotropnyh cilindrov pri dinamicheskom nagruzhennii (obzor). Soobshhenie 3. Fenomenologicheskie kriterii prochnosti / P.P. Lepihin, V.A. Romashhenko // Problemy prochnosti, 2013. – №3. – С.24–41.* (In Russian). Broughton, W.R., Crocker, L.E. and Gower M.R.L. (2002), "Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures". NPL Report MATC (A) 65, 50 p.
- [18] Tsai, S.W. and Wu, E.M. (1971), "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials", *Journal of Composite Materials*, vol. 5, pp. 58–80.
- [19] Whitney, J.M. and Nuismer, R.J., (1974), "Stress Fracture Criteria for Laminated Composite Containing Stress Concentrations", *Journal of Composite Materials*, vol. 8, pp 253–264.
- [20] Kollar, G.S. and Springer, L.P. (2003), "Mechanics of composite structures". Cambridge: Cambridge University Press, 480 p.