МІНІСТЕРСТО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ДИФУЧИН ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 539.319 : 621.88

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І МІЦНІСТЬ ОДНОЗРІЗНИХ БОЛТОВИХ З’ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

05.02.09 – динаміка та міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового

ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин і опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Рудаков Костянтин Миколайович,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бреславський Дмитро Васильович
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем

доктор технічних наук, професор
Кучер Микола Кирилович
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, завідувач відділу механіки конструкційних матеріалів (№2)

Захист відбудеться «____»__________ 2019 р. о_____годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.01 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. №1, ауд. №166.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «____» _________ 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради О.О. Боронко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Увага конструкторів спрямована на нові високоміцні та високомодульні композиційні матеріали (КМ), які за питомими показниками міцності і характеристиками жорсткості значно перевершують традиційні матеріали. Завдяки цьому КМ інтенсивно впроваджуються у відповідальних силових елементах космічних і авіаційних конструкцій, в суднобудуванні, на транспорті, тощо. Але механічні властивості КМ значно відрізняються від відповідних характеристик однорідних конструкційних матеріалів (металів, сплавів).

Шаруваті КМ за своєю суттю є конструкціями, оскільки складаються з окремих шарів – препрегів, які просочуються сполукою та потім остаточно формуються під дією тиску та температури. Саме тому не створюються бази даних з певними властивостями шаруватих КМ. Фізичні та механічні характеристики визначають і вказують тільки для окремих препрегів або матриць та наповнювачів: ниток, стрічок або тканин. Це ще одна відмінність КМ від однорідних матеріалів.

Виріб із КМ може бути суцільним або збиратися з окремих деталей. Основним рознімним механічним з'єднанням деталей з КМ у силових конструкціях, зокрема, авіаційних, є болтове з'єднання (БЗ). БЗ, в якому присутні деталі (пластини) із полімерних шаруватих КМ, будемо позначати як БЗ із ПКМ.

Розрахунок БЗ на міцність та (або) втому завжди потребує проведення статичного розрахунку характеристик напружено-деформованого стану (НДС) елементів з’єднання. При цьому класичні формульні підходи, розроблені для однорідних матеріалів (металів), для КМ не дають потрібної точності, тому вимагають корегування. У світі було проведено багато натурних експериментів з виявлення впливу різних конструкційно-технологічних факторів на міцність БЗ із КМ, але досі немає достатньо повного уявлення про поведінку КМ та БЗ із ПКМ, задовільних методів розрахунків їх на міцність.

Натурний експеримент не дозволяє "заглянути усередину матеріалу". Для цього можна використати сучасні розрахункові методи, зокрема, метод скінченних елементів (МСЕ), що посилює вимоги до застосовуваних ЕОМ. В умовах масової потреби таких розрахунків актуальною є розробка достатньо точних спрощених розрахункових 3D-моделей БЗ із ПКМ, які дозволяють проводити розрахунки не на супер-ЕОМ, а на персональних ЕОМ (ПЕОМ) підвищеної потужності. В результаті можна значно уточнювати розрахункові моделі для ПЕОМ, а саме: переходити до контактних моделей з пошаровим моделюванням ПКМ у зонах отворів, з урахуванням тертя, можливих зазорів при постановці болтів у отвори, зусилля згвинчування болтового з'єднання, температурних деформацій, розшарувань, відколів і інших технологічних дефектів, що допускаються в БЗ із ПКМ.

Уточнені розрахунки із застосуванням МСЕ дозволяють виявити особливості, більшість із яких неможливі в БЗ з однорідних матеріалів і які проясняють суть багатьох явищ, характерних для БЗ із ПКМ. Однак великий перелік факторів впливу, а також майже початковий стан таких розрахунків, не дозволив дотепер достатньо повно вивчити характеристики напружено-деформованого та граничного стану основних елементів БЗ із КМ пошарової структури.

Отже, проведення чисельного аналізу характеристик НДС болтових з'єднань елементів конструкцій із ПКМ з метою запропонування на їх основі модифікованих методів розрахунків їх міцності є актуальним. Дослідження в даній роботі ведеться стосовно до однозрізних БЗ окремого класу КМ на основі епоксидних матриць, зміцнених довгими високоміцними та високомодульними вуглецевими волокнами, тобто полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). В основному вивчається вплив лише двох параметрів БЗ: структури ПКМ та величин бічних зазорів болт/отвір.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі динаміки та міцності машин і опору матеріалів механіко-машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського на основі "Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между ГП «АНТОНОВ», АО УкрНИИАТ и кафедрой ДПМиСМ НТУУ "КПИ" от 16.02.2014 г." та ініціативної роботи у співпраці з УкрНДІАТ "Вплив технологічних факторів на типові з'єднання металевих сплавів з полімерними композиційними матеріалами", д/р № 0116U006245.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – обґрунтування модифікацій у методах розрахунків на статичну міцність однозрізних болтових з'єднань елементів конструкцій з шаруватими полімерно-композиційними матеріалами, на основі чисельних розрахунків характеристик НДС методом скінченних елементів, з докладним описом пошарової структури ПКМ та з врахуванням двох основних впливових факторів: пошарової структури та величин бічних зазорів болт/отвір, в рамках лінійно-пружної моделі матеріалів і контактної взаємодії складових з'єднання.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні завдання:

- визначитися з постановкою контактної крайової задачі, яка б враховувала основні впливові фактори: реальну геометрію, лінійну пружність, ізотропію болтів та 3D-ортотропію ПКМ, наявність сухого тертя між елементами з'єднання, затяг БЗ, силовий вплив, структуру ПКМ, величини бічних зазорів болт/отвір;
- визначитися з методикою побудови розрахункових моделей БЗ при застосуванні апробованого програмного коду, що використовує метод скінченних елементів;
- створити розрахункові моделі БЗ із ПКМ з урахуванням варіативності впливових факторів, що розглядаються, а також ресурсів ПЕОМ та способів зменшення їх потреб без втрати точності результатів;
- створити загальний алгоритм проведення розрахунків та аналізу характеристик НДС складових БЗ методом скінченних елементів з урахуванням контактних взаємодій та факторів, що моделюються;
- провести оцінку якості моделей та алгоритмів; шляхом змін у скінченно-елементних моделях домогтися збіжності результатів, що отримуються;
- провести розрахунки та аналіз їх результатів щодо характеристик НДС і міцності елементів зразка БЗ із ПКМ з урахуванням впливів факторів, що моделювалися;
- запропонувати модифікації у методах розрахунків однозрізних БЗ із ПКМ на статичну міцність.

Об'єкт дослідження: статична міцність однозрізного дворядного болтового з'єднання пластини із полімерно-композиційного матеріалу пошарової структури з металом (на прикладі зразка для випробування БЗ із ПКМ на втому).

Предмет дослідження: характеристики напружено-деформованого стану основних елементів об'єкта досліджень: болтів та пластини з ПКМ, а також критерії статичної міцності БЗ із ПКМ.

Методи досліджень. Поставлена в дисертації мета досягається застосуванням лінійної теорії анізотропної (для ПКМ) й ізотропної пружності, тривимірного комп'ютерного моделювання, а також методу скінченних елементів, з урахуванням контактної взаємодії елементів об'єкта дослідження; створення допоміжних комп'ютерних програм для аналізу результатів розрахунків. Ці моделі та методи забезпечують адекватний опис ПКМ, конструктивні та технологічні фактори БЗ із ПКМ, а також дозволяють отримати задовільну точність розрахунків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– виявлено, що в однозрізному БЗ із ПКМ підбором структури ПКМ можна майже вдвічі зменшити максимальні значення розподілених контактних зусиль на бічних поверхнях болтів (на поверхні отворів у пластинах з ПКМ). Це досягається переміщенням шарів з кутом укладення 0 градусів (відносно напрямку основного навантаження) вглиб пластини з ПКМ;
– виявлена значна спадна експоненціальна залежність величини площі контакту в отворах від збільшення зазору між бічними поверхнями болтів і отворів. Зміна структури ПКМ майже не впливала на величини вказаної площі;
– обґрунтовано достатньо точний алгоритм обрахування величин зусиль, що сприймаються перетином болтів, з урахуванням тертя в з'єднанні, через долю від повного навантаження;
– виявлено, що існують значні впливи як структури, так і величини зазору між бічними поверхнями болта й отвору на величини значущих (для міцності однозрізного дворядного БЗ із ПКМ) напружень, коефіцієнта вигину та коефіцієнта концентрації напружень;
– запропоновано модифікації в критеріях статичної міцності однозрізних БЗ на зминання та розрив, які враховують пошарову структуру ПКМ, величини бічних зазорів болт/отвір та виявлені особливості у напружено-деформованому стані БЗ із ПКМ.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

– розроблено детальний алгоритм створення ефективних скінченно-елементних моделей для розрахунків БЗ із шаруватими КМ (на прикладі зразка однозрізного дворядного болтового з'єднання), в яких враховано основні впливові фактори: реальна геометрія, структура ПКМ, величини бічних зазорів в отворах (між болтом та отвором), а також контактний характер взаємодії елементів з'єднання, тертя між елементами БЗ. В моделях, з метою зменшення вимог до комп'ютера, застосували змішані моделі для ПКМ: пошарову в зонах отворів та усереднену удалині від отворів – за теорією "ефективного модуля";
– отримані результати проведених чисельних розрахунків створених моделей надають значний обсяг достовірної інформації про характеристики НДС у матеріалах БЗ із ПКМ в зонах отворів;
– виявлені особливості та запропоновані зміни в критеріях статичної міцності однозрізних БЗ із ПКМ, які враховують пошарову структуру ПКМ та величини зазорів болт/отвір у з'єднаннях та можуть застосовуватися у практиці розрахунків

відповідних БЗ із ПКМ при проектуванні БЗ силових конструкцій авіаційної, космічної та іншої сучасної техніки.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП "КБ "Південне", УкрНДІАТ.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, автор отримав самостійно. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, безпосередньо автору належать формулювання завдань (разом з керівником); розробка математичних моделей і алгоритмів розв’язування крайових задач; проведення обчислювальних експериментів з визначення характеристик НДС елементів болтового з’єднання, обробка та аналіз результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися на шостій технічній конференції українського відділення міжнародного товариства з просування матеріалів та технологій (SAMPE), Київ, 17 листопада 2016 р., УкрНДІАТ; на XVIII та XIX Міжнародних науково-технічних конференціях "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта" (м. Київ, 2017, 2018), на тематичному семінарі кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" (м. Харків, 2018), на засіданнях кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів ММІ НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського" (м. Київ, 2018, 2019). Повністю робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри ДММтаОМ НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографії із 155 назв і викладена на 186 сторінках машинописного тексту, містить 50 малюнків, 32 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена актуальність теми дослідження, сформульовані мета та задачі дослідження, об’єкт, предмет та методи дослідження. Відмічена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено інформацію щодо зв’язку роботи з науковими темами, апробації результатів, та публікацій за темою дисертаційної роботи з визначенням власного внеску автора.

У першому розділі зроблено огляд проблем використання ПКМ у техніці, їхніх механічних властивостей, зокрема вуглепластикових ПКМ. Розглянуто основні особливості у болтових з’єднаннях деталей із ПКМ у порівнянні із болтовими з’єднаннями деталей із металів. Проведено огляд основних режимів роботи БЗ взагалі та вплив конструктивних та технологічних факторів на статичну міцність та утому болтових з’єднань деталей. Показані основні типи пошкоджень та руйнувань пластин із ПКМ від навантажень болтового з’єднання.

Підсумовуючи аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел, визначені такі основні положення:

Для загальних властивостей болтових з'єднань деталей:

– в однозрізних БЗ спостерігається більш значний вигин болтів і пластин, ніж у двозрізних, тобто створюються більш жорсткі умови деформування БЗ, сильніше виявляються залежності характеристик НДС при зміні впливових параметрів;
– фактичним стандартом для випробувань БЗ на міцність та утому є БЗ довгих пластин з шириною, що у шість разів перевищує діаметр болтових отворів та містить кількість з'єднуючих болтів, відповідну кількості рядів у реальному БЗ.

В болтових з'єднаннях деталей із однорідних матеріалів (металів):

– методи розрахунків на статичну міцність визначені та стандартизовані, фактично є інженерними, тобто не вимагають складних розрахунків;
– зразки на утому БЗ можуть руйнуватися і по нетто-перерізу пластин, і по брутто-перерізу пластин біля границь суміжних елементів БЗ (під впливом фретінг-корозії), втрачати несучу здатність від випереджального руйнування болтів;
– одночасне застосування осьового затягування болтів, радіального натягу в системі болт/отвір, а також зміцнення контактних поверхонь (все – в оговорених межах), є ефективним засобом для збільшення втомної міцності БЗ у декілька разів.

В болтових з'єднаннях деталей із ПКМ:

– внаслідок крихкості ПКМ не можна застосовувати а ні радіального натягу в системі болт/отвір, а ні зміцнення контактних поверхонь та матеріалу в околі отворів;
– є лише незначна кількість публікацій, в яких БЗ із ПКМ моделюються в контактній взаємодії, причому в них ПКМ зазвичай описують із застосуванням "еквівалентних модулів", і лише зрідка – як пошарову структуру;
– фактично не досліджувалися розподіл контактних зусиль на бічних поверхнях отворів у пластинах із ПКМ, вплив тертя, структури композитного матеріалу, бічних зазорів болт/отвір та багатьох інших параметрів БЗ на розподіл зусиль між болтами багаторядних БЗ, на НДС у шарах пластини із ПКМ навколо отворів;
– методи розрахунків на статичну міцність БЗ із ПКМ мають значну невизначеність та фактично не стандартизовані, що призводить до застосування до БЗ із ПКМ методів розрахунків на статичну міцність, обґрунтованих для однорідних матеріалів, з довільними та значно завищеними коефіцієнтами запасу міцності.

Отже, аналіз літературних джерел показав, що актуальним є уточнення методів розрахунків на міцність болтових з'єднань з ПКМ. Це уточнення можна провести лише на основі проведення чисельних розрахунків у вигляді крайових контактних задач, з пошаровим моделюванням шаруватих ПКМ, із врахуванням структури ПКМ, тертя, можливих зазорів, зусиль затягування болтів та інших впливових параметрів, із застосуванням сучасних кодів на основі МСЕ, з наступним аналізом отриманих характеристик НДС болтових з'єднань деталей із ПКМ та формалізацією виявлених впливів параметрів БЗ на його міцність.

Другий розділ присвячений розробці методики розрахунків характеристик НДС та міцності болтових з'єднань деталей на основі скінченно-елементного моделювання з урахування конструкційних і технологічних факторів. На основі літературних джерел проведена постановка крайової контактної лінійно-пружної задачі про НДС болтових з'єднань з ПКМ, описано основи методу розв'язування поставленої крайової задачі – методу скінченних елементів. На прикладі зразка для випробування болтового з'єднання пластини із ПКМ на втому описана методика

створення розрахункових моделей болтових з'єднань деталей із ПКМ з урахуванням: реальних (номінальних) геометричних розмірів окремих складових з'єднання; наявних площин симетрії геометричної та силової моделі з'єднання деталей; величин зазорів болт/отвір; властивостей матеріалів окремих складових БЗ; структури ПКМ; моменту скручування болта в БЗ; силового навантаження болтового з'єднання деталей; контактної взаємодії окремих складових з'єднання та тертя між ними; можливості створювати змішані моделі ПКМ (пошарове моделювання структури біля болтових отворів та 3D-ортотропний моно-матеріал з "еквівалентними" модулями пружності на деякому віддаленні від отворів).

На основі описаної методики було створено розрахункові моделі зразка болтового з'єднання деталей із ПКМ з варіюванням двох таких впливових параметрів, як зазор болт / отвір та структура ПКМ (рис. 1, таблиці 1-4). На основі літературних джерел сформульовано загальний алгоритм проведення розрахунків та аналізу характеристик НДС болтових з'єднань деталей МСЕ з урахуванням контактних взаємодій та факторів, що варіювалися.

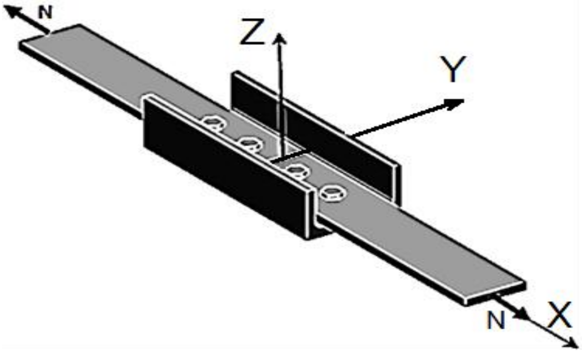


Рис. 1. Геометрична модель зразка для випробування на втому болтового з'єднання деталей із ПКМ

Таблиця 1

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

Таблиця 2

Геометричні розміри зразка болтового з'єднання деталей із ПКМ

Пластина, швелер		Діаметр отворів d, мм	Відстань між центральними болтами, мм	Відстань між болтами на периферії, мм
Елемент з'єднання	Товщина, ширина й довжина, мм			
Пластина	5,22; 30; 152	5,0	32	25
Швелер	6; 46; 112			

Таблиця 3

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}	μ_{12}	μ_{23}	μ_{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 4

Значення "еквівалентних" модулів пружності ПКМ, обчислені за результатами проведених чисельних експериментів

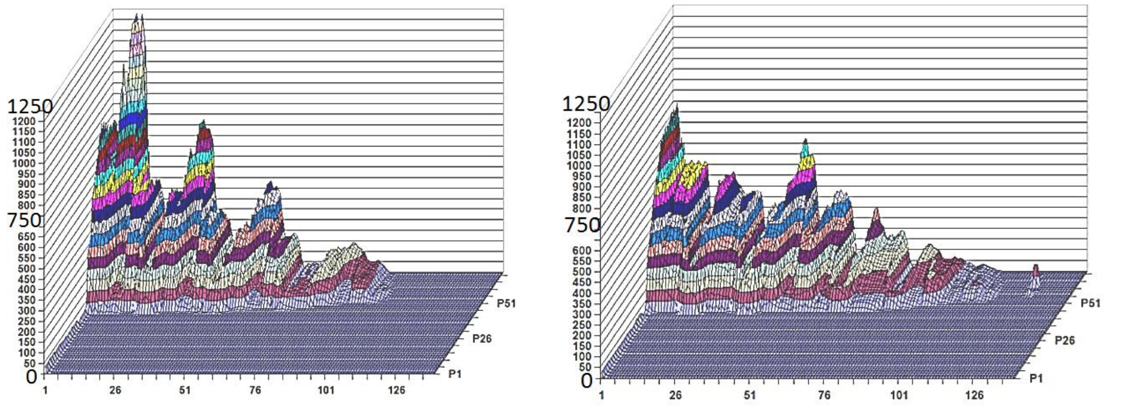
Структура ПКМ	Модулі Юнга, МПа			Модулі зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона		
	E_{XX}	E_{YY}	E_{ZZ}	G_{XY}	G_{YZ}	G_{XZ}	μ_{XY}	μ_{YZ}	μ_{XZ}
Всі структури	62960	62960	9200	16490	3900	3900	0,414	0,290	0,290

На основі попередніх чисельних розрахунків проведено загальну перевірку якості моделей зразка болтового з’єднання пластини із ПКМ; перевірку впливу на величину зусилля затягування в болтах при заміні гайки "другою голівкою болта"; перевірку якості моделей з огляду на збіжність результатів.

У третьому розділі з проведеного аналізу особливостей в розподілі розрахованих у серії з 24-х розрахунків (6 структур, по 4 значення зазорів) характеристик НДС в отворах пластин із ПКМ зробили наступні висновки.

Для поверхонь контакту. Підбором структури ПКМ можна зменшити максимальні значення розподілених контактних зусиль на поверхні отворів і бічних поверхнях болтів (рис. 2) на чверть або майже вдвічі (структура ПКМ-III відносно ПКМ-0). Відносна частка площі контактної поверхні від загальної площі поверхні отвору в ПКМ $\Delta_C = A_C / A$ майже не залежить від структури ПКМ та є спадною експоненціальною функцією від величини бічного зазору болт/отвір. Для аналітичної апроксимації даних (рис. 3) отримали таке наближення:

$\Delta_C = a + b \cdot \exp(-c \cdot \delta)$, де $a = 0{,}1133$, $b = 0{,}35$, $c = 0{,}025$ (значення δ – у мкм). (1)



а) б)

Рис. 2. Контактні розподілені зусилля по розгортці контактної циліндричної поверхні на площину, МПа, на поверхні першого отвору в зразку болтового з’єднання з δ =20 мкм: а) ПКМ-0; б) ПКМ-III

Обриси поверхонь контакту "хвилясті" (рис. 4), внаслідок згину болтів вони мають змінну ширину, максимум ширини – біля нижньої крайки отвору.

Спадний характер графіків (рис. 5) 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. Тобто дещо зростає частина, що сприймається за рахунок тертя та згину болта. Графіки напружень σ_X (рис. 6), побудовані вдовж лінії 1 (рис. 7-а)) на поверхні отвору в ПКМ, теж вказують на велику нерівномірність сприйняття шарами ПКМ основного зусилля, що діє на БЗ.

Для болтів. На рис. 7 наведено розподіл напружень на поверхні розсічення елементів зразка площиною XZ при дії на зразок БЗ зусилля, що розтягує, величиною N_X =10 КН. Підтверджені висновки щодо s–подібного згинання осей болтів в однозрізному болтовому з’єднанні, зроблені іншими дослідниками, але для болтового з’єднання металевих елементів (рис.7 б)). Для визначення сил N_i, що припадають на кожний болт, із результатів чисельних розрахунків одержали, що приблизно (20-30)% зусилля, прикладеного до зразка, сприймалася силою тертя між поверхнями пластини із ПКМ і швелера і не передавалася через контакти в отворах.

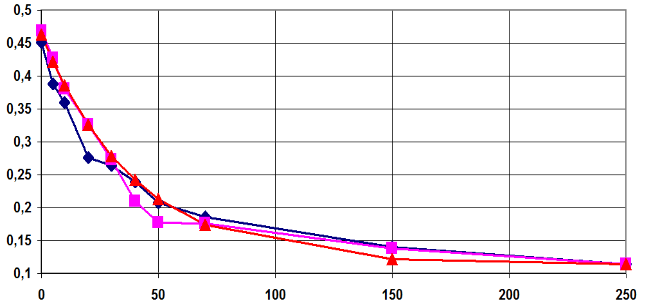


Рис. 3. Графіки залежності від бічного зазору δ відносної частки площі контактної поверхні від загальної площі отвору в ПКМ $\Delta_C = A_C / A$, для структури ПКМ-0 (♦ – отвір 1; ■ – отвір 2, ▲ – апроксимація)

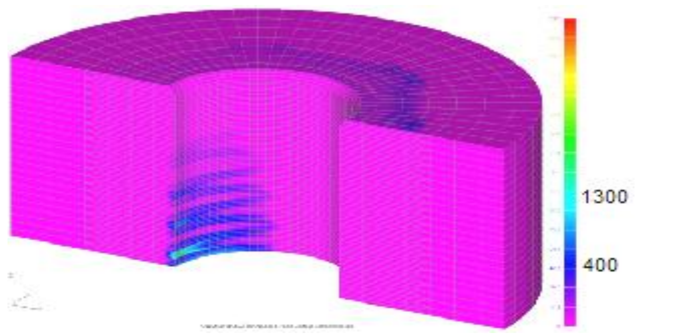


Рис. 4. Характерні обриси контактних поверхонь та рівні контактного розподіленого навантаження, МПа, на поверхнях отвору в ПКМ: ПКМ-0, δ=20 мкм

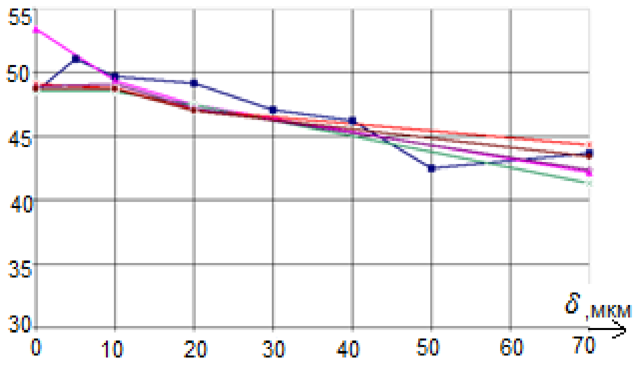


Рис. 5. Усереднені значення контактних розподілених зусиль, МПа, на поверхні першого отвору в ПКМ, у напрямку осі X (ПКМ: ■ –0; ▲ – -I; x – II; ж – III; ♦ –IV, ● – V)

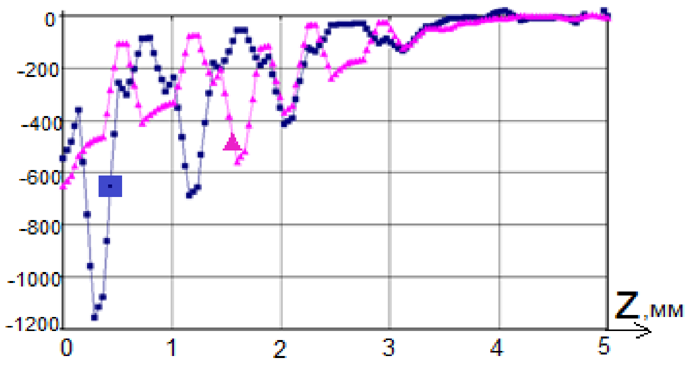
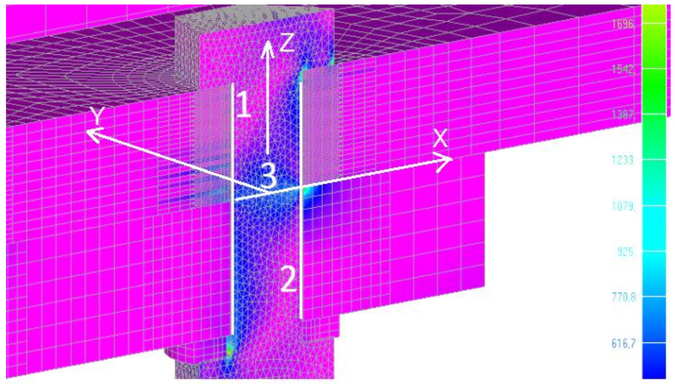
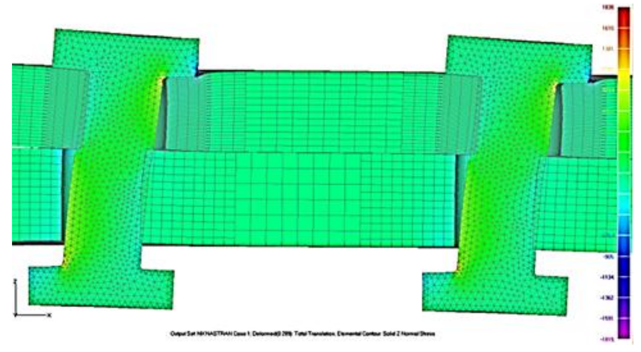


Рис. 6. Графіки напружень σ_X, МПа, вдовж лінії 1 (рис. 7-а)) для першого отвору в ПКМ, зазор болт/отвір $\delta = 20$ мкм, $N_X = 10$ КН (■ – ПКМ-0; ▲ – ПКМ-III)



а)



б)

Рис. 7. Напруження, МПа, на поверхні розсічення площиною XZ зразка: а) σ_{Mizes} (δ = 0 мкм, ПКМ–0); б) σ_Z (δ = 70 мкм, ПКМ–III, "анімація")

У зв'язку з цим ввели коефіцієнт $\chi < 1$, що визначає ту частину від сили N_X, що сприймається болтами, тоді $N_1 + N_2 = \chi N_X$. Також одержали, що відношення середніх значень (в "зрізних" перетинах болтів) дотичних напружень $(\tau_{XZ})_m$ мають незначну залежність від зазорів і структури.

Сили, сприймані болтами (і отворами), підраховували за формулою

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

де $A_i = \pi d_i^2 / 4$ – площі поперечних перерізів кожного болта. $((\tau_{XZ})_m)_i$–середні значення дотичних напружень у "зрізному" перерізі і-го болта.

Позначили, що $N_1 / N_2 = k$. Тепер сили, які сприймали отвори, виразили такими формулами

$$N_1 = N_X \chi \omega; \quad N_2 = N_X \chi (1-\omega); \quad \omega = k/(1+k). \tag{3}$$

Середньоквадратичне відхилення величин ω від середнього ω_m склало не більше 3,2%, тому в (3) замість конкретного для структури та величини зазору значення ω можна використати середнє для всіх значення $\omega_m = 0{,}54$. Середнє значення $k_m = 1{,}17$.

Отже, перший болт (отвір) зразка болтового з'єднання з ПКМ за рахунок напружень τ_{XZ} сприймав у середньому приблизно в $k = 1{,}17$ разів більшу частку навантаження від N_X, ніж другий. При зміні геометричних параметрів болтового з'єднання можна очікувати інші значення $k = k(\delta)$ й $\omega = \omega(\delta)$.

Для контактних напружень на поверхнях болтового отвору в пластині з ПКМ. Стрічка УОЛ-300-1А має такі границі міцності на розтяг та стиск: не менш ніж 1600 МПа та 700 МПа відповідно. Стрічку укладено під кутами 0^o й 90^o. Тканина 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. Ця тканина укладена в ПКМ під кутами $\pm 45^o$. Тобто для обох матеріалів стиск вздовж нитей є більш небезпечним, ніж розтяг. З аналізу критеріїв міцності композиційних матеріалів, а також означених вище властивостей міцності композитних стрічок, зробили висновок, що в першу чергу потрібно аналізувати найбільші за модулем напруження стискання (критерій максимальних напружень, приблизно 23% застосування в практиці розрахунків).

Очевидно, що напруження в шарах ПКМ виникають під дією зусиль затягування пакета й основного навантаження N_X, а також від зчеплення із сусідніми шарами внаслідок значних відмінностей напрямків укладання й модулів пружності матеріалів шарів із тривимірною ортотропією.

Для розривних напружень у пластинах із ПКМ в ослаблених отворами перетинах. З'єднання (матеріал пластини) в ослабленому отвором перетині розраховують на розрив, причому в інженерному критерії міцності застосовується теоретичний коефіцієнт концентрації напружень (на вертикальній лінії 4 на рис. 8):

$$\frac{\underline{N}_i \underline{\widehat{\widetilde{\alpha}}}_i}{h(w - m d_i)} \le [\sigma]_{tensile},$$

де $\underline{N}_i$ – зусилля, що сприймає перетин, ослаблений *і*-им отвором; i – номер отвору, $i = 1, 2$; h, w – товщина та ширина пластини в зоні отвору; m – кількість болтів ряду в перетині шириною w; m=1; d_i–діаметр *і*-го отвору; $[\sigma]_{tensile}$ – допустиме напруження на розрив матеріалу; $\underline{\widehat{\widetilde{\alpha}}}_i$ – результуючий (дуга над α) коефіцієнт

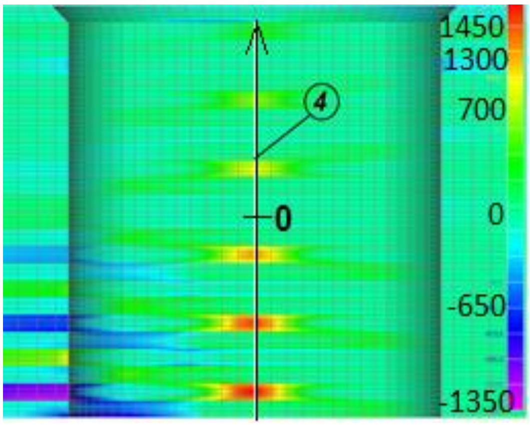


Рис. 8. Напруження σ_{11}, МПа, на поверхні отвору 1, структура ПКМ-0, $\delta = 10$ мкм

концентрації напружень у i-ому навантаженому контактними силами (підкреслення) отвору з ортотропного композиційного (значок тильди над α) матеріалу:

$$\underline{\tilde{\alpha}}_i = \frac{((\sigma_X)_{\max})_i}{((\sigma_X)_{nom})_i} > 1,\; i = 1,2.$$

Оскільки пікові значення напруження σ_X повинні реалізовуватися на поверхні отвору вздовж утворюючої циліндричної поверхні, то аналізували графіки σ_{11} (рис. 9) (нормальні напруження по напряму першої головної осі ортотропії) вздовж лінії 4 на рисунку 8. У зразку болтового з'єднання, що аналізується, $m = 1$ та $d_1 = d_2 = d$, тому

$$((\sigma_X)_{nom})_i = \frac{\underline{N}_i}{h(w-d)},\; i = 1,2.$$

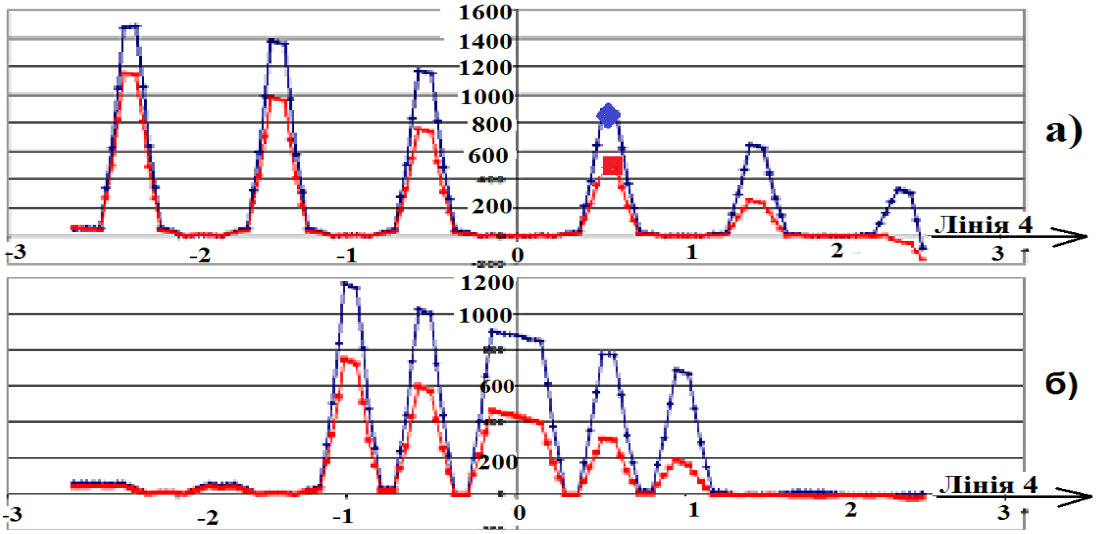


Рис. 9. Напруження σ_{11} (МПа) в ПКМ на лінії 4 в отворах: а) структура ПКМ-0, $\delta = 10$ мкм; б) структура ПКМ-III, $\delta = 70$ мкм (♦ – отвір 1, ■ – отвір 2)

Сила, яку сприймає перетин, послаблений найближчим до зовнішньої сили отвором (першим), $\underline{N}_1 = N_X$, а перетин, послаблений іншим отвором (другим) – $\underline{N}_2 = N_2 = N_X \chi (1-\omega)$, тому

$$((\sigma_X)_{nom})_1 = \frac{N_X}{h(w-d)};\quad ((\sigma_X)_{nom})_2 = \frac{N_X \chi (1-\omega)}{h(w-d)}.$$

З графіків рис. 9 виділили складову напружень розтягу без напружень згину, а також згинальну складову. Оскільки на графіках максимальні та мінімальні значення напружень відносяться до окремих шарів пластини з ПКМ, тоді знаходили (табл.5) ККНс (для шару тільки від розтягу навантаженням $\underline{N}_i$, що сприймає перетин, ослаблений i-им отвором). Також знаходили (табл.6) ККНос (для шару від

розтягу та від згинання пластини з ПКМ). Для другого отвору коефіцієнти ККНс і ККНос більші, ніж для першого, оскільки послаблений перетин у першого отвору передає повне навантаження, а у другого – тільки ту частину навантаження, яку сприймає другий болт. Тому номінальні напруження у другому перетині значно менші, ніж у першому (приблизно удвічі), при тому, що максимальні напруження в перетинах у отворів різняться не так значно.

Таблиця 5

Значення коефіцієнтів концентрації напружень шару (ККНс) $(\underline{\tilde{\alpha}}_{(\bar{\sigma}_x)})_i$, $i=1,2$ на поверхні отворів пластини з ПКМ

Вариант структуры	$(\underline{\tilde{\alpha}}_{(\bar{\sigma}_x)})_1$				$(\underline{\tilde{\alpha}}_{(\bar{\sigma}_x)})_2$				Середні значення	
	Зазор δ, мкм				Зазор δ, мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70	$(\underline{\tilde{\alpha}}_{(\bar{\sigma}_x)})_1$	$(\underline{\tilde{\alpha}}_{(\bar{\sigma}_x)})_2$
ПКМ–0	12,3	11,2	11,1	9,6	20,9	19,8	17,3	9,7	11,0	16,9
ПКМ–I	13,3	12,5	12,3	10,8	22,2	22,6	20,2	17,6	12,2	20,6
ПКМ–II	13,7	13,0	12,6	11,2	25,0	23,5	21,3	16,5	12,6	21,6
ПКМ–III	13,7	13,1	12,7	11,5	24,8	22,1	20,4	15,1	12,8	20,6
ПКМ–IV	13,4	12,7	12,6	11,4	24,1	21,0	22,6	15,8	12,5	20,9
ПКМ–V	13,6	12,9	12,5	11,6	24,6	23,6	23,0	17,6	12,7	22,2

Таблиця 6

Значення узагальнених коефіцієнтів концентрації напружень шару ККНос $(\underline{\underline{\tilde{\alpha}}}_{(\sigma_x)})_i$, $i=1,2$ на поверхні отворів пластини з ПКМ

Варіант структури	$(\underline{\underline{\tilde{\alpha}}}_{(\sigma_x)})_1$				$(\underline{\underline{\tilde{\alpha}}}_{(\sigma_x)})_2$				Середні значення	
	Зазор δ, мкм				Зазор δ, мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70	$(\underline{\underline{\tilde{\alpha}}}_{(\sigma_x)})_1$	$(\underline{\underline{\tilde{\alpha}}}_{(\sigma_x)})_2$
ПКМ–0	20,2	19,3	19,2	17,3	42,9	44,4	39,3	35,0	19,0	40,4
ПКМ–I	20,1	19,9	19,4	17,3	41,9	44,7	43,0	35,4	19,2	41,2
ПКМ–II	19,0	18,9	18,4	16,4	41,9	41,1	37,9	32,6	18,2	38,4
ПКМ–III	17,6	17,3	16,8	15,2	36,9	35,4	32,6	26,8	16,7	32,9
ПКМ–IV	17,4	17,0	17,0	15,1	36,8	35,0	37,1	27,8	16,6	34,1
ПКМ–V	17,7	17,4	16,9	15,4	37,6	37,5	36,2	29,7	16,8	35,2

У статті Р.Ю. Решетнікової "Влияние осевого натяга на локальное напряженное состояние в односрезных болтовых соединениях" узагальнені коефіцієнти концентрації напружень мали асимптотичне обмеження приблизно у 11 одиниць. У ній аналізувалося однорядне однозрізне болтове з’єднання металів (а не КМ). Якщо для номінальних напружень у ПКМ брати площу не повного нетто-перетину, а лише частину його, заповнену шарами з кутом укладання 0^o, то розрахункова площа зменшиться, тому збільшаться номінальні напруження і зменшаться коефіцієнти концентрації напружень таблиць 5 та 6.

Отже, існують значні впливи як структури, так і величини зазору між бічними поверхнями болта та отвору, на величини максимальних (пікових) розривних напружень σ_x вздовж лінії 4 (див. рис. 8). Найбільші значення коефіцієнта згину на поверхнях отворів реалізуються в структурі ПКМ-0, а найменші – в структурі ПКМ-III. При цьому значення коефіцієнта згину для другого отвору приблизно вдвічі більше, ніж для першого отвору. Коефіцієнт концентрації напружень шару (ККНс) досягав значення у 12,7 одиниць для першого отвору, та 22,2 одиниці – для другого

отвору. Узагальнений коефіцієнт концентрації напружень шару (ККНос) досягав значення у 19,2 одиниць для першого отвору, та 41,2 одиниць – для другого отвору.

У четвертому розділі розглянуто інженерні методи розрахунків болтових з'єднань на статичну міцність у застосуванні до композитних матеріалів у вигляді модифікацій відомих формул для розрахунків на статичну міцність БЗ. Відмічено, що формули, які є інженерними і використовуються для розрахунків на міцність при зминанні болтів та болтових отворів, а також для розрахунків на міцність на розрив ослаблених болтовими отворами перерізів елементів БЗ із ізотропних матеріалів, не у повній мірі відповідають таким розрахункам для композиційних матеріалів, оскільки для останніх розподіл пікових значень контактних напружень, що призводить до зминання контактуючих поверхонь болт/отвір, а також розривних напружень на поверхнях отворів у послаблених перерізах, має складний характер (ступінчастий) та суттєво залежить від структури ПКМ та від величини зазору болт/отвір. Суттєву роль грає розподіл величини навантажень між болтами у багаторядних БЗ, який залежить від тертя між поверхнями елементів з'єднань з ПКМ (розділ 3).

Для розгляду статичної міцності болтів. Титановий сплав з високою міцністю ВТ-16, з якого виготовлений болт, вважається помірно пластичним та ізотропним. Тобто на статичну міцність болт можна розраховувати за енергетичним критерієм що використовує еквівалентне напруження σ_{Mizes}, графіки якого для БЗ з ПКМ наведено на рис. 10-а вздовж лінії 2 (див. рис. 7-а) та на рис. 10-б вздовж лінії 3 (див. рис. 7-а).

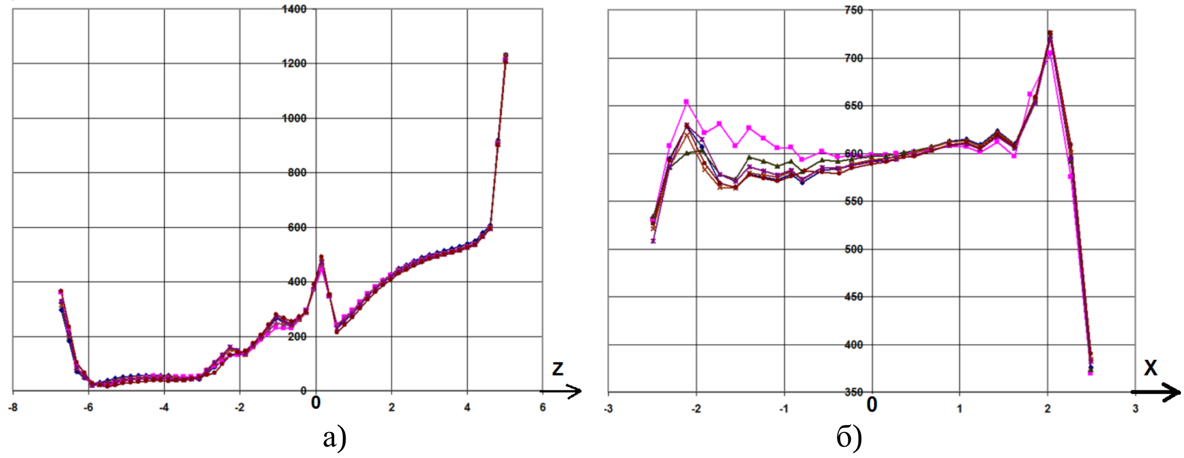


Рис. 10. Напруження σ_{Mizes} (МПа): а) на лінії 2 (усі структури), б) на лінії 3 (усі структури)

При N_X=0 (відсутності зовнішнього навантаження) напруження σ_{Mizes} під верхньою голівкою болта дорівнювало приблизно 800 МПа (від затягування). Після прикладення сили N_X=10 КН величина σ_{Mizes} під верхньою голівкою болта зросла майже у 1,5 разів (до 1200 МПа). Це є наслідком S-подібного вигину болта.

Зростання σ_{Mizes} під поверхнею бічної поверхні болта (при Z=0 й $X \approx$-2 мм та $X \approx$2 мм (рис. 10-б), вздовж лінії 3 на рис. 7-а) пов'язане з контактним характером взаємодії цієї поверхні з крайкою отвору в швелері. Два пікові значення (рис. 10-б) з величинами приблизно 650 МПа й 725 МПа, що виникли внаслідок контактної взаємодії, можуть бути зменшені пластичними деформаціями (зминанням) поверхні

лише частково. При цьому найбільше значення у 725 МПа ($X \approx 2$ мм на рис. 10-б) практично не залежало від обраної структури ПКМ.

В інженерному підході умова статичної міцності на зріз для $i-$го болта задається формулою

$$\tau_i = \frac{N_i}{A} \le [\tau]_{shear}, \ i = 1,2, \qquad (4)$$

де у нашому випадку площа перерізу болта $A = \pi d^2 / 4 \approx 19{,}6$ мм^2 ($d = 5$ мм), а умова статичної міцності на зминання контактної поверхні болта – формулою

$$(\sigma_{CM})_i = \frac{|N_i|}{A_{CM}} \le [\sigma]_{bearing}, \ i = 1,2, \qquad (5)$$

де приведена площа зминання $A_{CM} = hd = 26{,}1$ мм^2 (товщина пластини із ПКМ $h = 5{,}22$ мм), а величини навантаження на болти N_i, $i = 1,2$ – за формулою (3).

В правих частинах формул (4) та (5) присутні допустимі напруження, в яких задіяні відповідні коефіцієнти запасу на міцність. Згідно з частковим врівноваженням N_X силами тертя, коефіцієнти запасу на міцність в цих формулах є завищеними приблизно на 20÷30 %.

Підсумовуючи, можна констатувати, що статична міцність болта залежить від напружень, що виникають під голівкою болта та в різьбленні (останнє не розглядали), зрізують та зминають (класичні уявлення, але з поправкою на вплив сил тертя), а також і під бічною поверхнею болта на рівні площини зрізу (від контакту з крайкою отвору) і вздовж тієї бічної поверхні болта, яка розтягується при його згинанні.

Втомна міцність болтів. Розрахунки підтвердили наявність ефекту, виявленого раніше (стаття "Про вплив величини зазору між болтом та отвором на напружений стан болта однозрізного болтового з’єднання в зоні "зрізу" авторів К.М. Рудаков, О.А. Добронравов), що при віднульовому циклі навантаження N_X у точці бічної поверхні болта, яка контактує з крайкою отвору в ПКМ, реалізується майже симетричний цикл змін осьового напруження σ_Z. Напруження вздовж лінії 3 (див. рис. 7-а) болта тільки від затягування (без навантаження N_X) додатне та дорівнювало приблизно 230 МПа. При навантаженні силою N_X в точці контакту (див. рис. 7-а), правий край лінії 3) виникало напруження σ_Z (рис. 11, правий край графіку), що досягало від’ємного значення близько 350 МПа. Тобто цикл навантаження-розвантаження БЗ силою N_X викликає зміну напружень, близьку до симетричного циклу. Це може змінити характер втомного руйнування болта, а саме: відрив замість зрізу.

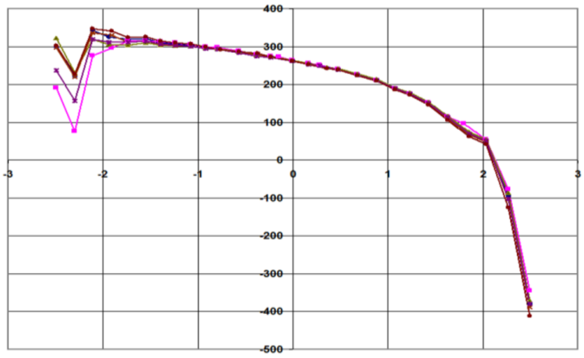


Рис. 11. Графіки напружень σ_Z, МПа, вздовж лінії 3 (див. рис. 7-а) для першого болта, δ=10 мкм: (ПКМ: ■ – 0; ▲ – I; x – II; ж – III; ♦ – IV; ● – V)

Інженерний варіант розрахунку композита на зминання. Розрахунок на зминання контактних поверхонь отворів у пластині із ПКМ можна проводити за

класичною формулою, в яку додатково введена функція впливу декількох параметрів:

$$\frac{|N_i|}{h_i d_i}\cdot F(q_1,q_2,...)\le[\sigma]_{bearing},\quad i = 1, 2, \qquad (6)$$

де N_i – сумарне зусилля, сприймане i-м отвором (болтом); h_i – товщина пластини навколо i-го отвору; d_i – номінальний діаметр i-го отвору; $F(q_1,q_2,...)$ – функція, що враховує вплив параметрів БЗ: вихідної величини зазору δ_i болт/отвір (на діаметр) у пластині із ПКМ, структури шаруватого ПКМ, вигину й т.д.; $[\sigma]_{bearing}$ – довідкове напруження, що допускається на зминання матеріалу пластини із ПКМ.

Сприйняття шарами ПКМ контактного тиску в отворах. Розподіл контактного тиску в отворі пластини із ПКМ є дуже нерівномірним (див. рис. 2, рис. 6). Максимуми відповідають шарам з укладкою уздовж дії сили N_i, тобто з кутом укладання 0^o, а мінімуми (але не нулі) – шарам з кутом укладання 90^o. Якщо болт буде мати порівнянну із шарами КМ із кутом укладання 0^o жорсткість бічної поверхні, то саме ці шари в шаруватому КМ повинні зминатися в першу чергу. Оцінили частку від загального зусилля N_i, сприйману шарами з кутом укладання 0^o. Припустили що ця частка дорівнює частці в еквівалентному модулі Юнга, що приходиться на шар. Скористалися формулою Фойгта, що застосовується для підрахунку еквівалентних пружних модулів односпрямованого композита й дає верхню оцінку:

$$E_{ekv}=\left(\sum V_i h_i E_i\right)/h_\Sigma, \qquad (7)$$

де V_i – вагова частина *i-го* шару в односпрямованому композиті; E_i – модуль пружності; h_i – номінальна товщина шару; h_Σ – сумарна товщина шарів. Для характерної підструктури композита $[45/0/-45/90]$ формулу (7) переписали як

$$(E_{11})_{ekv}=[h_L(E_{11})_0+h_L(E_{22})_{90}+\lambda 2h_T(E_{11})_{\pm45}]/h_\Sigma, \qquad (8)$$

де коефіцієнт приведення λ при відомому значенні $(E_{11})_{ekv}$ дозволяє (при необхідності) перерахувати внесок модулів пружності шарів, покладених під кутами $\pm45^o$ до основного напрямку. З (8) також маємо формули для оцінки відносних внесків шарів з різними кутами укладання в опір деформуванню в основному напрямку:

$$\eta_0=h_L((E_{11})_0/(h_\Sigma(E_{11})_{ekv}),\quad \eta_{90}=h_L((E_{22})_0/(h_\Sigma(E_{11})_{ekv}),\quad \eta_{\pm45}=\lambda 2h_T(E_{11})_{\pm45}/(h_\Sigma(E_{11})_{ekv}). \qquad (9)$$

Використовуючи значення модулів з таблиць 3 і 4, товщини шарів 0,235 мм (УОЛ-300-1А) і 0,220 мм (УТ-900-3А), одержали, що $\lambda\approx0{,}5865$. Маємо відносні внески шарів з різними кутами укладання в опір деформуванню в основному напрямку: $\eta_0=38736/62960\approx0{,}6153$; $\eta_{90}\approx0{,}0328$; $\eta_{\pm45}\approx0{,}3519$. Підструктура має чотири шари з різними кутами укладання, тому ввели відповідний показник s=1/4=0,25. Розділивши на s значення η_0, η_{90} і $\eta_{\pm45}$, одержали, у скільки разів змінюється величина розрахункового середнього тиску $((p_X)_i)_m=N_i/(h_i d_i)$ при перерахунку на шар: в $\beta_0=\eta_0/s\approx2{,}461$, $\beta_{90}=\eta_{90}/s\approx0{,}1313$ і $\beta_{\pm45}=\eta_{\pm45}/s\approx1{,}408$ разів. Отримане значення β_0 перевірили в чисельному експерименті із застосуванням МСЕ. Змоделювали розтяг вузької пластини з ПКМ, з розмірами

перетину, як і в зразку БЗ, що аналізується (табл.2). Отримали, що $\beta_0 \approx 2.439$, тобто від значення $\beta_0 = \eta_0 / s \approx 2,461$ відрізнялося лише на 0.9%. Тобто коефіцієнти β_0, β_{90} та $\beta_{\pm 45}$ не повністю, але в значній мірі й прямо характеризують вплив структури ПКМ на перерозподіл контактних тисків, що виникають від сили N_i.

Оскільки $\beta_0 > 1$, то на нього необхідно помножити чисельник формули (6), тобто тепер можна прийняти, що для найбільш навантаженого шару параметр $q_1 = \beta_0$, тоді функція впливу для (6):

$$F(q_1, q_2, ...) = \beta_0 \cdot f_q(q_2, q_3, ...).$$

Максимальні рівні контактних напружень. Вигин болта формує різні рівні контактних напружень, сприйманих шарами з кутом укладання 0^o (див. рис. 2). З результатів розрахунку для структур ПКМ-0 і ПКМ-III підрахували середні значення $(p_m)_i$ від максимальних значень контактних тисків $p_{\max}$ у шарах з кутом укладання 0^o (їх у пакеті ПКМ шість), усереднену згинальну складову $(p_u)_i$, а також коефіцієнти згину $(k_u)_i$:

$$(p_m)_i = \frac{1}{6}\sum_{n=1}^{6}(p_{\max})_n; \quad (p_u)_i = 0,5(p_{\max} - p_{\min}); \quad (k_u)_i = (p_u)_i / (p_m)_i; \quad i = 1,2,$$

де в якості $p_{\max}$ й $p_{\min}$ приймали максимальні та мінімальні значення контактних тисків. Структура ПКМ-III має найменший коефіцієнт згину. Крім того, вона має й менші рівні середнього тиску на шари з кутом укладання 0^o. Це результат розташування шарів з кутом укладання 0^o ближче до серединної площини пластини.

Якщо тепер підрахувати пікові значення контактних тисків по формулі:

$$(\underset{\sim}{p}_{\max})_i = (\underset{\sim}{p})_i(1 + k_u); \quad i = 1,2, \tag{10}$$

то одержимо величини, близькі до максимальних значень контактних тисків.

Множником $(1 + k_u)$ фактично ввели ще один параметр функції впливу для (6), тобто $q_2 = k_u$ й одержали її у вигляді:

$$F(q_1, q_2, ...) = \beta_0 \cdot (1 + k_u) \cdot f_q(q_3, q_4, ...).$$

Варіанти проведення розрахунку болтового з'єднання із ПКМ на зминання. Запропонували два варіанти алгоритму перевірочних розрахунків на статичну контактну міцність (зминання отвору) болтового з'єднання із шаруватим композитом.

Варіант 1 – *уточнена оцінка*:

1. Проведення скінченно-елементного моделювання характерної ділянки болтового з'єднання, з максимально можливим згущенням сітки СЕ в зоні отворів і моделюванням кожного шару композита мінімум трьома СЕ по товщині. Можна застосовувати змішану модель композита. Задачу формулювати як контактну, з урахуванням тертя, а також з урахуванням зазорів та інших конструктивно-технологічних факторів.

2. Проведення розрахунків моделі (достатньо персональної ЕОМ зі збільшеним розміром оперативної пам'яті).

3. Одержання з результатів розрахунків пікових значень контактних тисків $(p_{\max})_i$ в отворах і порівняння їх з напруженням, що допускаються на зминання для матеріалу даного шару: $(p_{\max})_i \le [\sigma]_{bearing}$, що за змістом відповідає класичній інженерній формулі $|N_i|/(h_i d_i) \le [\sigma]_{bearing}$; i =1, 2.

Варіант 2 – *експрес-оцінка*:

1. Проведення (яким-небудь методом, зокрема, одиничним розрахунком як у варіанті 1, з подальшим застосуванням формул (2) і (3)) оцінки величини зусилля, що доводиться на $i-$ий отвір болтового з'єднання.
2. Підрахунок величини наведеного тиску в отворі $(p_m)_i = |N_i|/(h_i d_i)$, що фігурує в лівій частині інженерної формули $|N_i|/(h_i d_i) \le [\sigma]_{bearing}$.
3. Підрахунок величини еквівалентного модуля пружності $(E_{11})_{ekv}$ ПКМ.
4. Оцінка внеску шарів ПКМ, покладених під кутом 0^o до основного напрямку дії навантаження, тобто величини η_0, використовуючи першу формулу (9). Підрахунок за формулою $(\underset{\sim}{p}_m)_i = (p_m)_i \cdot \eta_0 / s$ величини наведеного тиску, що доводиться на шари з кутом укладання 0^o.
5. Оцінка коефіцієнта згину k_u в пластині проведенням одиничного уточненого розрахунку (як у варіанті 1) або яким-небудь іншим способом.
6. Підрахунок максимального значення контактного тиску в отворі, за формулою (10), і порівняння їх з напруженням, що допускають на зминання для матеріалу даного шару: $(p_{\max})_i \le [\sigma]_{bearing}$.

Обидва варіанти потребують проведення розрахунків із застосуванням МСЕ.

Розрахунки на статичну міцність ослаблених отворами перетинів шаруватих композитів у болтових з'єднаннях. Пікові величини напружень, обумовлених концентрацією у навантажених болтами отворів виникають на лінії 4 (див. рис. 8).

Інженерний розрахунок на розрив ортотропної пластини на статичну міцність в ослабленому i -им отвором перетині проводиться за формулою:

$$\frac{|\underline{N}_i|\underline{\alpha}_i}{h(w - md_i)} \le [\sigma]_t; \quad i=1,\, 2, \tag{11}$$

де $[\sigma]_t$ - допустиме напруження на розтяг матеріалу ПКМ, $\underline{N}_i$ – зусилля, сприймане перетином, ослабленим *i-им* отвором; h, w – товщина й ширина пластини в зоні отвору; m – кількість болтів ряду. $\underline{\alpha}_i$ – узагальнений коефіцієнт концентрації напружень у $i-$го отвору (ККНо), який враховує вплив згину, бічного зазору болт/отвір, структуру ПКМ, тертя, інші. У розділі 3 вдалося отримати значення коефіцієнта концентрації напружень у отворів в пластині із ПКМ для *максимально навантаженого шару* (ККНо шару, або ККНос), з урахуванням бічного зазору болт/отвір і структури ПКМ.

Якщо знати частку від загального зусилля $\underline{N}_i$, яка сприймається в ПКМ *максимально навантаженим* шаром, то можна буде користуватися формулою (11) як розрахунком за локальним напруженим станом. За формулою (9) відносні внески шарів з різними кутами укладання в опір деформуванню в основному напрямку дорівнюють $\eta_0 \approx 0{,}6153$; $\eta_{90} \approx 0{,}0328$; $\eta_{\pm 45} \approx 0{,}3519$. Максимальний внесок у

першого отвору $\eta_1 = \eta_0$. Максимальне значення ККНос для поверхні ПКМ у першого отвору $\underline{\tilde{\alpha}}_1 \approx 20{,}2$ (див. таблицю 6, структура ПКМ-0, зазор δ=0 мкм), тому

$$|\underline{N}_1|\,\tilde{\alpha}_1 = |\underline{N}_1|\,\eta_1\underline{\tilde{\alpha}}_1 \approx |\underline{N}_1|\cdot 0{,}6153\cdot 20{,}2 \approx |\underline{N}_1|\cdot 12{,}4\,, \qquad (12)$$

тобто можемо вважати, що в перерахуванні від шару з кутом укладання 0°, для формули (11), реалізувалося значення ККНо $\underline{\alpha}_i = 12{,}4$.

У таблиці 6 максимальне значення ККНос для ПКМ у другого отвору дорівнює 42,9 для структури ПКМ-0 та зазору δ = 0 мкм. При цьому, відношення номінальних напружень у перетинах у отворів 2 та 1, $\zeta = 26/77 \approx 0{,}3377$. Оскільки ослаблені перетини мають однакову площу, то $\underline{N}_2 = \zeta\underline{N}_1 \approx 0{,}3377\underline{N}_1$. Аналогічно (12) маємо

$$|\underline{N}_2|\,\tilde{\alpha}_2 = |\underline{N}_2|\,\eta_2\underline{\tilde{\alpha}}_2 = |\underline{N}_1|\,\zeta\eta_2\underline{\tilde{\alpha}}_2 \approx |\underline{N}_1|\cdot 0{,}3377\cdot 0{,}6153\cdot 42{,}9 \approx |\underline{N}_1|\cdot 8{,}90\,, \qquad (13)$$

тобто небезпечна зона перетину у другого отвору завантажена менше, ніж у першого, незважаючи на більше значення ККНос для ПКМ у цього отвору.

Базовий коефіцієнт концентрації розривного напруження. В роботі Echavarrı´a, C., Haller, P. and Salenikovich, A. "Analytical study of a pin–loaded hole in elastic orthotropic plates" теоретично отримана наближена формула для 2D-ортотропної пластини одиничної товщини з навантаженим болтом отвором при відсутності тертя та бічного зазору болт/отвір, де $\varsigma = d/w$, d –діаметр отвору, w – ширина пластини:

$$\underline{\tilde{\alpha}}(\varsigma) = \frac{\sigma_{\max}(\varsigma)}{\sigma_{nom}} = \frac{1-\varsigma}{\varsigma}\left[\frac{\varsigma}{2} + \left(\frac{\varsigma}{2} + \frac{4}{\pi^2}\right)\sqrt{\frac{E_{XX}}{E_{YY}}}\sqrt{2\left(\sqrt{\frac{E_{YY}}{E_{XX}}} - \mu_{YX}\right) + \frac{E_{YY}}{G_{XY}}}\right]. \qquad (14)$$

В одній з моделей, для перевірки формули (14), змоделювали лише перший отвір, матеріал пластини – стрічка УОЛ-300-1А з кутом укладання 0^0, тертя в контактній парі отвір-болт не задавали. Ця модель дала теоретичний ККНк $\underline{\tilde{\alpha}}_1(1/6)_{MCE} \approx 16{,}0$. Порівняно з ККНк $\underline{\tilde{\alpha}}(1/6) \approx 16{,}3$, отриманим за формулою (14), відхилення склало лише приблизно -1,8%. До того ж пікове значення, отримане за допомогою МСЕ, і повинне бути дещо меншим, ніж отримане аналітичним розв'язком. Тобто можна зробити висновок, що формула (14) та розв'язок МСЕ дали фактично однаковий результат для ККНк $\underline{\tilde{\alpha}}(1/6)$.

Визначення поправочної функції та її залежності від структури ПКМ і бічного зазору болт/отвір для зразка БЗ для випробування на утому. У формулі (14) враховані ортотропія матеріалу, контакт отвору з болтом, хоча і без тертя, а також відносна ширина пластини, тобто найбільш важливі фактори. У зв'язку із цим оцінку ККНк $\underline{\tilde{\alpha}}$ у навантаженому циліндром (болтом) отворі вважаємо *базовою* оцінкою (ККНб). Для БЗ з багатошаровими пластинами із ПКМ ввели узагальнену поправочну функцію $\underline{\Psi}_i$, яка додатково буде враховувати всі інші присутні фактори впливу, такі як згин пластини, тертя, структура, залежність від величини зазору болт/отвір, інші.

Поправочну функцію $\underline{\Psi}_i$ ввели як відношення між ККНс $\underline{\tilde{\alpha}}_i$ шару БЗ з ПКМ до ККНб $\underline{\tilde{\alpha}}$, підрахованого для *ортотропної* однорідної по товщині пластини без згину, тобто отриманим відповідно до формули (14). Значення $\underline{\Psi}_i$, $i = 1{,}2$ в залежності від структури та бічного зазору болт/отвір вирахували з даних таблиці 6

за формулами (12) й (13) відповідно для першого та другого отвору, з наступним діленням на ККНб, тобто на $\tilde{\underline{\alpha}}(1/6) \approx 16{,}3$.

Значення $\underline{\psi}_i$, $i = 1{,}2$ можна представити у вигляді функції:

$$\underline{\psi}_i(\delta) = \psi_i^* \cdot f_i(\delta), \tag{15}$$

де у якості функції ψ_i^* обрали значення $(\underline{\psi}_i)_{\delta=0}$. З отриманих значень $\underline{\psi}_i$, $i = 1{,}2$ та, графіків функцій $f_i(\delta)$ (рис. 13) випливає, що для усіх структур ці функції спадні, причому їх залежності від величин зазорів близькі до лінійних й коефіцієнти пропорційності будуть близькими. Тому можемо записати, що

$$f_i(\delta) \approx 1 - \beta_i \cdot \delta; \qquad \underline{\psi}_i = \psi_i^* \cdot (1 - \beta_i \cdot \delta). \tag{16}$$

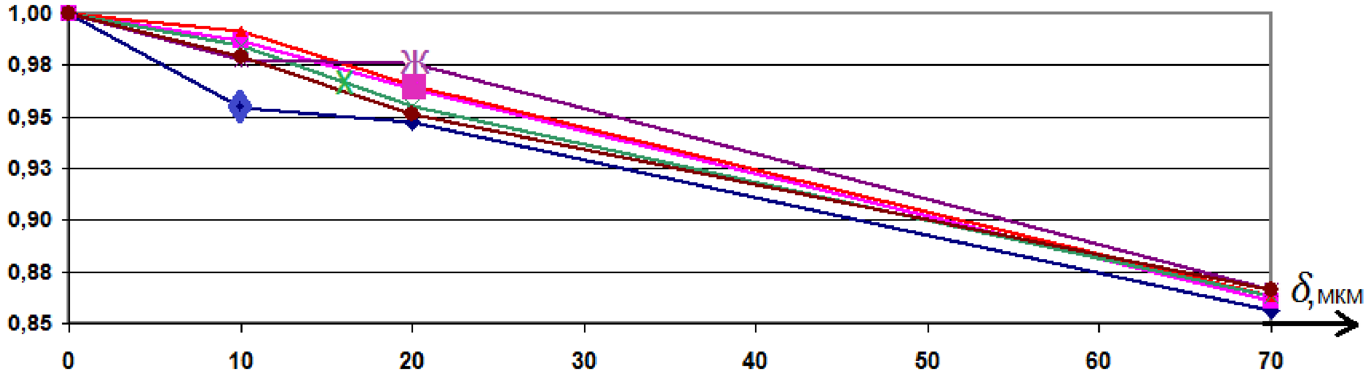


Рис. 13. Графіки функції $\underline{\psi}_1(\delta)$ для різних структур: ♦ – ПКМ-0, ■ – ПКМ-I, ▲ – ПКМ-II, х – ПКМ-III, ж – ПКМ-IV, ● – ПКМ-V

Як виявилося, для формули (16) усереднене значення коефіцієнта $\beta \approx \beta_1 \approx \beta_2 \approx 0{,}002$, якщо величину бічного зазору δ підставляти у мікрометрах.

Отримані значення $\underline{\psi}_i$, $i = 1{,}2$ перерахували шляхом ділення на значення функції $f_i(\delta)$, тобто отримали значення функції ψ_i^*. Результати звели у таблицю 7.

Таблиця 7

Значення ψ_i^*, $i = 1{,}2$ на поверхні отворів пластини з ПКМ зразка БЗ

Варіант структури	ψ_1^*				ψ_2^*				Середні значення	
	Зазор δ, мкм				Зазор δ, мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70	$(\psi_1^*)_{ср}$	$(\psi_2^*)_{ср}$
ПКМ–0	0,763	0,743	0,755	0,759	0,547	0,578	0,522	0,519	0,755	0,541
ПКМ–I	0,759	0,767	0,763	0,759	0,534	0,581	0,571	0,525	0,762	0,553
ПКМ–II	0,717	0,728	0,624	0,720	0,534	0,535	0,503	0,483	0,722	0,514
ПКМ–III	0,664	0,666	0,661	0,667	0,470	0,460	0,433	0,397	0,665	0,440
ПКМ–IV	0,657	0,655	0,668	0,663	0,469	0,455	0,493	0,412	0,661	0,457
ПКМ–V	0,668	0,670	0,665	0,676	0,479	0,488	0,481	0,440	0,670	0,472

Середні відхилення значень ψ_i^* від $(\psi_i^*)_{ср}$, $i = 1{,}2$, не перевищили 0.4% та 1.5% відповідно, що прийнятно.

Введемо у розгляд наступні величини: $z_{0\max}$ – відстань середини шару з кутом укладання 0 градусів, найбільш віддаленого від серединної поверхні пластини з ПКМ, та $z_0^* = z_{0\max} / (h/2)$, де h – товщина цієї пластини.

Оскільки напруження згину проявляються на фоні напружень від затягування пакета (останні відносно малі) та від основного навантаження, що розтягує зразок, а ПКМ як матеріал вважається лінійно-пружним, то функція впливу структури на величину ККН буде мати у першому наближенні вигляд лінійної функції

$$f_i^*(z_0^*) \approx 1 + \gamma_i \cdot (z_0^* - \underline{z}_0^*), \qquad (17)$$

де γ_i – коефіцієнт апроксимації для i–го отвору; $\underline{z}_0^*$ – значення z_0^* для "базової" структури, відносно якої проводиться порівняння, щоб $f_i^*(\underline{z}_0^*) = 1$.

За "базову" узяли структуру з найбільшим значенням $\underline{z}_0^*$=0,875, це структура ПКМ-0. Тому усі значення рядків таблиці 7 поділили на відповідні (зазору δ) значення рядка структури ПКМ-0, отримали таблицю 8.

Таблиця 8

Значення $(z_0^* / \underline{z}_0^*)_i$, $i = 1,2$ на поверхні отворів пластини з ПКМ зразка БЗ

Варіант структури	$(z_0^* / \underline{z}_0^*)_1$				$(z_0^* / \underline{z}_0^*)_2$			
	Зазор δ, мкм				Зазор δ, мкм			
	0	10	20	70	0	10	20	70
ПКМ–0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
ПКМ–I	0,995	1,031	1,010	1,000	0,977	1,007	1,094	1,011
ПКМ–II	0,941	0,979	0,958	0,948	0,977	0,926	0,964	0,931
ПКМ–III	0,871	0,896	0,875	0,879	0,860	0,797	0,830	0,766
ПКМ–IV	0,861	0,881	0,885	0,873	0,858	0,788	0,944	0,794
ПКМ–V	0,876	0,902	0,880	0,890	0,876	0,845	0,921	0,849

Потім дані таблиці 8 апроксимували функцією (17) і отримали, що $\gamma_1 \approx \gamma_2 = \gamma \approx 0.275$. Після чого усі значення рядків таблиці 7 поділили на значення функції (17), відповідні структурі, й отримали таблицю 9, для якої додатково обрахували середні значення невизначеної частини функції впливу ψ_i, $i = 1,2$.

Таблиця 9

Значення ψ_i, $i = 1,2$ на поверхні отворів пластини з ПКМ зразка БЗ

Варіант структури	ψ_1				ψ_2				Середні значення	
	Зазор δ, мкм				Зазор δ, мкм					
	0	10	20	70	0	10	20	70	$(\psi_1)_{cp}$	$(\psi_2)_{cp}$
ПКМ–0	0,763	0,743	0,755	0,759	0,547	0,578	0,522	0,519	0,77	0,54
ПКМ–I	0,794	0,802	0,798	0,794	0,559	0,608	0,597	0,549		
ПКМ–II	0,783	0,795	0,790	0,786	0,583	0,584	0,549	0,528		
ПКМ–III	0,756	0,758	0,751	0,759	0,535	0,524	0,492	0,452		
ПКМ–IV	0,747	0,745	0,760	0,754	0,534	0,518	0,560	0,469		
ПКМ–V	0,760	0,762	0,756	0,769	0,545	0,555	0,547	0,501		

Отже, отримали функцію впливу величин бічних зазорів болт/отвір δ та структури пластини з ПКМ, вираженої через відносні відстані шарів з кутом укладання 0 градусів, яка одночасно враховує впив вторинного вигину:

$$\underline{\psi}_i = f_i(\delta) \cdot f_i^*(z_0^*) \approx (1 - \beta_i \cdot \delta) \cdot [1 + \gamma_i \cdot (z_0^* - \underline{z}_0^*)]. \qquad (18)$$

В таблиці 9 немає значень ψ_i, $i = 1,2$, більших за одиницю. Тобто у БЗ з ПКМ, що аналізується, реальний ККН у отворів є меншим, ніж визначені за формулою (14) ККНб у 16,3 одиниці для одного шару. Очевидно, це тому, що проявляються впливи сусідніх шарів, які значно *знижують* концентрацію напружень.

Відзначимо, що завищена приблизно на чверть оцінка ККНб у першого отвору, що обрахована за формулою (14), буде консервативною, тобто буде компенсувати всі невизначеності. У другого отвору така оцінка завищена майже вдвічі.

Алгоритми оцінки статичної міцності БЗ із ПКМ на розрив ослабленого отвором перетину. Узагальнюючи результати досліджень пропонуються два варіанти алгоритмів розрахунку на статичну міцність (на розрив) ослабленого отвором перетину в пластині із ПКМ.

Варіант 1 – *уточнена оцінка*:

1. Провести скінченно-елементне моделювання характерної ділянки болтового з'єднання з максимальним згущенням сітки СЕ в зоні концентрації напружень і моделюванням кожного шару ПКМ мінімум трьома СЕ по товщині. Можна застосовувати змішану модель ПКМ. Задачу формулювати як контактну, з урахуванням тертя, зазорів та інших конструктивно-технологічних факторів.

2. Провести розрахунки для моделі (достатньо застосування персональної ЕОМ зі збільшеним розміром операційної пам'яті).

3. Отримати з результатів розрахунків значення $(\sigma_X)_{\max}$ і порівняти його з допустимим на розрив напруженням для матеріалу даного шару: $(\sigma_X)_{\max} \le [\sigma]_t$ (це відповідає формулі (11) та критерію міцності за максимальним напруженням).

Оскільки скінченно-елементні розрахунки дають всі компоненти напружень, то можна застосувати будь-який з інших критеріїв міцності.

Варіант 2 – *експрес-оцінка*.

1. Прийняти $\underline{N}_1 = N_X$.

2. Підрахувати теоретичний ККНк у навантаженого болтом отвору в пластині з ортотропного матеріалу за формулою (14), в якій використати характеристики матеріалу з найбільшим значенням $E_{XX} = E_{11}$ у напрямку дії силового навантаження (з кутом укладання 0^{o}). Завищена на чверть оцінка ККНб у першого отвору буде консервативною, тобто буде компенсувати всі невизначеності, зокрема, можлива відсутність другого болта.

3. Підрахувати величину відносного внеску обраного шару в опір деформуванню в основному напрямку, тобто η_0, відповідно до формул (8) – (9). Прийняти $\eta_1 = \eta_0$.

4. Для врахування впливу бічного зазору болт/отвір та/або впливу структури ПКМ визначитися з величинами коефіцієнтів β та/або γ, що входять до відповідних формул. Якщо якийсь із впливів враховуватися не буде, то відповідний коефіцієнт призначити нульовим;

5. Для врахування впливу структури ПКМ оцінити величину $z_0^* = z_{0\max} / (h/2)$;

6. Підрахувати ККН для першого отвору

$$\underline{\alpha}_1 = \underline{\tilde{\alpha}} \cdot \eta_1 \cdot (1 - \beta \cdot \delta) \cdot [1 + \gamma \cdot (z_0^* - \underline{z}_0^*)] \cdot \psi_1, \tag{19}$$

де невизначену частину поправочної функції ψ_1 (враховує взаємний вплив шарів пластини з ПКМ) взяти з діапазону $\psi_i \in [0.75...0.8]$ при повній відсутності даних, або обґрунтувати в експерименті (натурному або чисельному);

7. Провести оцінку міцності за формулою (11).

Обидва варіанти потребують проведення розрахунків із застосуванням МСЕ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі на прикладі зразка для випробування дворядного однозрізного болтового з’єднання пластини із шаруватого полімерного композиційного матеріалу (ПКМ) на втому (далі – зразка БЗ), полягають у наступному.

Наукові.

Завдяки систематичному чисельному моделюванню однозрізного дворядного болтового з’єднання пластини з ПКМ (БЗ) з варіюванням величини бічного зазору та структури встановлено, що:

1) при збільшенні величини зазору болт/отвір δ (у мкм) відносна величина площі контактної поверхні $\Delta_C = A_C / A$ зменшується за експонентою (1), яка є єдиною для різних структур пластини з ПКМ;

2) при розрахунках на міцність послабленого отвором перетину пластини з ПКМ для всіх структур функція впливу величини бічного зазору болт/отвір $f_i(\delta)$ на коефіцієнт концентрації напружень єдина, має спадний та практично лінійний характер, може бути апроксимована виразом (16);

3) за наближену (експрес) оцінку БЗ на контактну міцність (зминання отвору) можна використати формулу (6) з поправочною функцією $F(q_1, q_2, ...) \approx \beta_0 \cdot (1 + k_u)$;

4) у статичному розрахунку міцності БЗ на розрив пластини із ПКМ в ослабленому отвором перетині за *базову* оцінку можна прийняти значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень $\underset{\sim}{\tilde{\alpha}}$ у навантаженого болтом отвору в пластині з *ортотропного* матеріалу, підрахованого за формулою (14). Уточнення експрес-оцінки можна проводити використанням запропонованих поправочних функцій.

Практичні:

1) удосконалена методика створення розрахункових моделей болтових з’єднань деталей із ПКМ з урахуванням: реальних геометричних розмірів, площин симетрії геометричної та силової моделей БЗ, величин зазорів болт/отвір, властивостей матеріалів окремих складових БЗ, структури ПКМ, моменту скручування болта в БЗ, силового навантаження БЗ, контактної взаємодії окремих складових БЗ та тертя між ними, можливості створювати змішані моделі ПКМ (пошарове моделювання структури та 3D-ортотропній моно-матеріал з "еквівалентними" модулями пружності);

2) за наявності згину пластини з ПКМ, підбором структури ПКМ можна значно зменшити максимальні значення розподілених контактних зусиль на поверхні отворів і бічних поверхнях болтів;

3) розподіл сил, що сприймають болти БЗ, з великою точністю можна обчислити за величинами дотичних напружень, що виникають у центрі площини зрізу болтів. При цьому "автоматично" враховуються сили тертя;

4) підтверджено, що при віднульовому циклі силового навантаження $N_X \in [0 \rightleftarrows (N_X)_{\max}]$ в точці бічної поверхні болта, що контактує з ребром отвору,

реалізується майже симетричний цикл змін осьового напруження σ_z. Цей ефект дуже негативний, оскільки при циклічному навантаженні симетричний цикл є найбільш руйнівним. До того ж це може змінити характер втомного руйнування болта: відрив замість зрізу.

Для кращого визначення поправочних функцій необхідно проводити додаткові дослідження – натурні й чисельні. Для отримання більш точних оцінок потрібно проводити чисельні розрахунки із застосуванням методу скінченних елементів та розробленої удосконаленої методики (див. п. 1) практичних результатів).

Методики чисельного моделювання, що розроблені в дисертаційній роботі, а також експрес-оцінки міцності болтових з'єднань ПКМ, прийняті для використання при розробці проектної та конструкторської документації на нові вироби космічної та авіаційної техніки, про що є відповідні акти від ДП "КБ "Південне" та УкрНДІАТ, наведені у Додатках.

Отримані в результаті виконання дисертаційної роботи результати можна кваліфікувати як вирішення важливого науково-технічного завдання, що полягає у вивченні закономірностей розподілу напружень та в розробці достовірних методик розрахунків на міцність однозрізних дворядних болтових з'єднань з шаруватими полімерними композиційними матеріалами.

Ці методики є універсальними для аналогічних об'єктів авіаційного, космічного та іншого призначення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем створені скінченно-елементні моделі, проведені всі розрахунки, оброблені результати щодо якості моделювання, написана частина статті із загальним описом об'єкта дослідження.*

2. 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. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведені варіативні розрахунки скінченно-елементних моделей, оброблені результати, написані відповідні частини статті.*

3. 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. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведені всі розрахунки, створені інформативні рисунки, побудовані графіки та апроксимація результатів, а також написані відповідні частини статті.*

4. Dyfuchyn Y. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers / Y. Dyfuchyn, K. Rudakov // Mechanics and Advanced Technologies #1 (79), 2017. pp.19-25. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведені всі розрахунки, створені інформативні рисунки, побудовані*

таблиці та графіки отриманих результатів, а також написані відповідні частини статті.

5. Дифучин Ю.Н. Анализ разрывных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в зонах отверстий в пластинах с ПКМ образца болтового соединения / Ю.Н. Дифучин, К.Н. Рудаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2017. – Вып. 3 (91). – С. 47-60. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем створені інформативні рисунки, побудовані таблиці та графіки отриманих результатів, узагальнених коефіцієнтів концентрації напружень в зонах отворів в пластинах з ПКМ зразка болтового з'єднання, а також написані відповідні частини статті.*

6. Рудаков К.Н. О расчетах болтового соединения на разрывное разрушение ослабленного отверстием сечения композитной пластины / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин // Mechanics and Advanced Technologies #1 (82), 2018. С. 58-66. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведені всі додаткові розрахунки, створені інформативні рисунки, побудовані таблиці та графіки отриманих результатів, сформульовано два можливих алгоритму розрахунків пластини на розрив послабленого отвором перетину пластини з ПКМ, а також написані відповідні частини статті.*

7. Рудаков К.Н. О расчетах болтового соединения на смятие отверстий в пластине из слоистого полимерного композиционного материала / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин // Mechanics and Advanced Technologies #2 (83), 2018. С. 42-50. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведені всі додаткові розрахунки, створені інформативні рисунки, побудовані таблиці та графіки отриманих результатів, сформульовано два можливих алгоритму розрахунків пластини на зминання поверхні отвору пластини з ПКМ, а також написані відповідні частини статті.*

8. 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. (Входить до НМБ Index Copernicus). *Здобувачем проведено пошук публікацій, зроблені всі розрахунки, створені інформативні рисунки, побудовані таблиці та графіки отриманих результатів, а також написані відповідні частини статті.*

9. Дифучин Ю.М. Про напружено-деформований стан болтових з'єднань з ПКМ // Матеріали XVIII МНТК "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", 2017. С. 46-48.

10. Дифучин Ю.М. Розрахунки болтового з'єднання на зминання отворів в пластині з полімерного композиційного матеріалу // Матеріали XVIII МНТК "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", 2018. С. 97-101.

АНОТАЦІЯ

Дифучин Ю.М. Напружено-деформований стан і міцність однозрізних болтових з'єднань елементів конструкцій з композиційних матеріалів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню модифікацій у методах розрахунків на статичну міцність однозрізних болтових з'єднань (БЗ) елементів конструкцій з шаруватими полімерно-композиційними матеріалами (ПКМ). Основою для обґрунтувань виступають чисельні розрахунки характеристик напружено-деформованого стану методом скінченних елементів. Розроблено алгоритм створення ефективних скінченно-елементних моделей для розрахунків БЗ із ПКМ з урахуванням впливових факторів: структури ПКМ, величини зазорів болт/отвір, контактної взаємодії елементів, тертя між ними. Алгоритм застосовано для побудови моделі зразка однозрізного дворядного БЗ з ПКМ, який використовується для випробовувань на утому з варіюванням таких параметрів, як зазор болт/отвір та структура ПКМ. Застосувалися змішані моделі для ПКМ: пошарова в зонах отворів, а удалині – за теорією "ефективного модуля". Виявлена спадна залежність відносної величини площі контакту в отворах від збільшення зазору болт/отвір. Запропоновано алгоритм обчислення величин зусиль у перетинах болтів з урахуванням тертя в БЗ через долю від повного навантаження. Виявлені значні впливи структури ПКМ та величини зазору болт/отвір на величини напружень, коефіцієнтів вигину та концентрації напружень у БЗ, у зв'язку з чим запропоновані модифікації в критеріях статичної міцності однозрізних БЗ із ПКМ.

Ключові слова: композиційні матеріали, болтові з'єднання, скінченно-елементні апроксимації, пружні характеристики, напружено-деформований стан, міцність.

АННОТАЦИЯ

Дифучин Ю.М. Напряженно-деформированное состояние и прочность односрезных болтовых соединений элементов конструкций из композиционных материалов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена научному обоснованию модификаций в методах расчетов на статическую прочность односрезных болтовых соединений (БС) элементов конструкций со слоистыми полимерно-композиционными материалами (ПКМ). Основой для обоснований выступают численные расчеты характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов.

Разработан алгоритм создания эффективных конечно-элементных моделей для расчетов БС с ПКМ, с учетом влияющих факторов: структуры ПКМ, величины зазоров болт / отверстие, контактного взаимодействия элементов, трения между

ними. Алгоритм применен для построения модели образца односрезного двухрядного БС с ПКМ, который используется для испытаний на усталость с варьированием таких параметров, как зазор болт / отверстие и структура ПКМ. Применялись смешанные модели для ПКМ: послойная в зонах отверстий, а вдали - по теории "эффективного модуля". Обнаружена значительная нисходящая зависимость относительной величины площади контакта в отверстиях от увеличения зазора болт / отверстие. Предложен алгоритм вычисления величин усилий в сечениях болтов с учетом трения в БС через долю от полной нагрузки. Выявлены значительные влияния структуры ПКМ и величины зазора болт / отверстие на величины напряжений, коэффициентов изгиба и концентрации напряжений в БС, в связи с чем предложены модификации в критериях статической прочности односрезных БЗ с ПКМ.

Ключевые слова: композиционные материалы, болтовые соединения, конечно-элементные аппроксимации, упругие характеристики, напряженно-деформированное состояние, прочность.

SUMMARY

Dyfuchyn Yu.M. Stress-deformed state and strength of single-lap bolted joints of structural elements of composite materials. – Manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in the specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines.– National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the scientific substantiation of modifications in the calculation methods for the static strength of single-shear bolted joints (BJ) of structural elements with carbon fibre reinforced plastic (CFRP). The basis for the substantiation is numerical calculations of the characteristics of the stress-deformed state by the finite element method. These calculations take into account two main impact factors: the layer-by-layer structure and the bolt / hole lateral clearances in use of the linear-elastic model of materials and the contact interaction of the compound components taking into account friction.

An analysis of existing approaches to the description of the stress-strain state of bolted joints of structural elements made of both isotropic and composite materials is carried out in the work from domestic and foreign literary sources.

The calculation of the BJ for strength and (or) fatigue always requires a static calculation of the characteristics of the stress-deformed state of the connecting elements. In this case, the classical formula approaches developed for homogeneous materials (metals), for BJ with the CFRP do not give the required accuracy, require correction. In the world, many experiments were carried out to determine the impact of various structural and technological factors on the strength of the BJ with the CFRP, but however, there is still a lack of satisfactory methods for calculating their strength.

Consequently, carrying out a numerical analysis of the stress-deformed state characteristics of bolted joints of structural elements with CFRP, in order to offer on their basis modified methods for calculating their strength, is an actual task that is of scientific and practical interest.

A detailed algorithm has been developed to create effective finite element models for calculating BJ with layered CFRP (using the sample of a single-lap double-row bolt joint used for fatigue testing). The main influencing factors are taken into account in the models: the CFRP structure, the size of the lateral gaps in the holes (between the bolt and the hole), as well as the contact nature of the interaction of the connection elements, friction between the BJ elements. In order to reduce computer requirements, it was used mixed models for CFRP: layered in the zones of bolt holes and averaged at a distance from holes - according to the theory of the "effective module".

The obtained results of the numerical calculations of the created models provide a significant amount of reliable information about the characteristics of the stress-deformed state in the BJ materials in the holes zone.

As a result of numerical calculations of the stress-deformed state characteristics by the finite element method, features in the distributions of stresses and strains in the material of bolts and CFRP plates were found. Six CFRP structures were modeled (one real and five models), their changes in stress-deformed state at the same load were analyzed. It is revealed that in the presence of bending of a CFRP plate, selection of the CFRP structure can significantly reduce the maximum values of the distributed contact forces on the surface of the holes and the side surfaces of the bolts.

A significant downward dependence of the relative size of the contact area in the holes on increasing the bolt / hole gap was found. A change in the structure of the CFRP had almost no effect on the values of the indicated area.

The algorithm for calculating the magnitudes of the forces perceived by the sections of the bolts, taking into account friction in the connection, as a fraction of the total load, is substantiated.

It was revealed that there are significant effects of both the CFRP structure and the gap between the side surfaces of the bolt and the hole on the values of significant (for the strength of a single-lap double-row BJ with CFRP) stresses, bending coefficient, and stress concentration coefficient. The latter for the second hole (more distant from place of force applied) is almost twice as large as for the first one and correlates in its values with the coefficients obtained for metal constructive elements of analogical BJ, if we take into account not all the net section of CFRP plate, but only the area of the layers with a laying angle of 0 degrees relative to the direction of action of the force that stretches the sample.

Features have been identified and modifications proposed in the conditions of static strength of single-section BS of structural elements from PCM, which take into account the layered structure of PCM and the bolt / hole clearances in joints, which can be used in the practice of calculating the corresponding BS from PCM in the design of BS of power structures of aviation, space and other modern technology.

Keywords: composite materials, multilayer carbon fiber plates, bolted joints, finite element approximations, elastic characteristics, stress-strain state, strength.

Підписано до друку 19.09.19 р. Формат 60х90 1/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення № 521
Віддруковано на різографі в видавничому центрі "Принт-центр"
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
http:\\www.printc.com.ua. E-mail printcentr@ukr.net