

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Барахова Костянтина Петровича «Статичний напружене-деформований стан
клейових з'єднань в напуск», подану на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасні тенденції розвитку авіаційної і ракетно-космічної техніки та інших галузей машинобудування характеризуються постійно зростаючими вимогами до підвищення надійності та одночасного зниження загальної ваги конструкцій та її елементів. Одним із перспективних напрямів удосконалення тонкостінних конструкцій є використання полімерних композиційних матеріалів (КМ). Але застосування класичних типів механічних з'єднань (клепка, болтове з'єднання, зварювання та ін.) для КМ має певні обмеження та супроводжується ускладненням технології виготовлення. Тому розробка ефективних клейових з'єднань для виробів з КМ має надзвичайно велике значення.

Клейові з'єднання в напуск є найбільш поширеним типом таких з'єднань, який дозволяє ефективно передавати повз涓ажні зусилля між з'єднуваними елементами конструкції. Сучасні технології склеювання дозволяють створювати з'єднання навіть різномірних матеріалів, які за міцністю не поступаються з'єднуваним елементам і можуть працювати при екстремальних силових навантаженнях.

Надзвичайно важливою для практики є необхідність достовірного прогнозування міцності і надійності таких з'єднань, а це, в свою чергу, висуває високі вимоги до розробки нових, більш досконалих та адекватних, моделей і методів розрахунку напружене-деформованого стану клейових з'єднань в напуск при статичному силовому навантаженні.

Використання підходів, заснованих на використанні тривимірного моделювання таких з'єднань пов'язано з подоланням значних математичних та обчислювальних труднощів. Контактна взаємодія шарів, значна відмінність основних фізико-механічних параметрів та геометричних розмірів складових з'єднання, зокрема, товщини клейового шару, призводить до високих градієнтів напружень в околі з'єднання. Це вимагає зменшення розміру скінчених елементів при числовому розрахунку, чи виключення із аналізу відповідних

особливих точок. Як наслідок, більшість відомих результатів у цій галузі отримані з використанням спрощених одновимірних моделей, недоліки яких пов'язані із неможливістю повністю врахувати в рамках цих моделей просторовий характер деформування з'єднання. З цієї точки зору дослідження механіки взаємодії елементів клейових з'єднань не можна вважати завершеними.

Дисертація К. П. Барахова присвячена побудові уточнених математичних моделей клейових з'єднань випуск, які більш точно описують процес деформування та дозволяють побудувати аналітичні розв'язки відповідних задач дослідження напруженно-деформованого стану клеєних конструкцій. Саме тому, тема дисертаційної роботи є важливою для розвитку фундаментальних та прикладних знань і є актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла.

Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, виконано у відповідності з держбюджетною темою «Розвиток математичних методів дослідження прикладних задач» (ДР № 0119U002517).

Повнота та обґрунтованість наукових положень дисертацій, її висновків та результатів

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел із 141 найменування та двох додатків. Перший розділ дисертації завершується постановкою мети та задач досліджень, усі інші – висновками, де коротко наводяться отримані у розділі результати та вказується, у яких роботах автора вони були опубліковані. Обсяг дисертації становить 139 сторінок.

Дисертація має досить чітку структуру і являє собою результати комплексного системного дослідження, присвяченого побудові, розвитку та узагальненню моделей клейових з'єднань випуск. Матеріали дисертації викладені чіткою мовою із застосуванням зрозумілих технічних термінів.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета й задачі досліджень, а також визначені наукова новизна й практична значимість роботи, ступінь висвітлення результатів у публікаціях і особистий внесок автора.

Перший розділ присвячений огляду сучасного стану проблеми оцінки міцності клейових з'єднань випуск. Основна увага у ньому приділена аналізу існуючих моделей клейових з'єднань, визначенню їх недоліків та обмежень. Крім того, у розділі подано можливі шляхи розвитку моделей НДС клейових з'єднань випуск.

У другому розділі розроблено дві уточнені моделі статичного НДС клейового з'єднання в напуск для двох прямокутних пластин, дано постановку, аналітичний розв'язок та отримано числові результати для двох задач про напружений стан з'єднання з некласичними крайовими умовами, а саме: з'єднання, в якому один несучий шар навантажено поздовжніми зусиллями, а інший – має жорстке закріплення вздовж бічної сторони, і задача про НДС клейового з'єднання в напуск, в якому один несучий шар навантажено дотичними зусиллями зсуву, а інший – має жорстке закріплення вздовж бічної сторони.

У третьому розділі проведено моделювання клейових з'єднань циліндричних оболонок. Наведено спрощені двовимірні моделі статичного НДС клейових з'єднань, побудовано аналітичні розв'язки задач зі знаходження статичного НДС клейового з'єднання двох циліндрів без та з урахуванням вигину з'єднань. Найбільш цікавими, з моєї точки зору, є дослідження напружень у клейовому шарі з врахуванням впливу форми закінцівок з'єднання та напливу клею.

У четвертому розділі розглянуто практично важливу задачу про клейове з'єднання пластини, яка має круглий отвір, з концентричною накладкою. Задачу розглянуто у двох постановках – без урахування вигину й поперечних переміщень та з їх урахуванням. Найбільш цікавими, з моєї точки зору, є дослідження клейового з'єднання із урахуванням вигину самого з'єднання та частини пластини поза зоною склеювання.

Висновки, зроблені наприкінці, є ретельно обґрунтованими

Наукова новизна

У дисертації запропоновано ряд нових уточнених моделей клейових з'єднань пластин та циліндричних оболонок, які базуються на класичних моделях Фолькерсена та Голанда–Рейсснера. Для усіх розглянутих задач отримано аналітичні розв'язки.

Розвинуто моделі статичного НДС клейових з'єднань прямокутних пластин, які, на відміну від класичних моделей, враховують нерівномірний розподіл дотичних напружень за ширину з'єднання, що дозволило отримати аналітичні розв'язки задач з новими, не властивими для моделі Фолькерса та Голанда–Рейсснера, крайовими умовами.

Створено нові моделі статичного НДС з'єднань циліндричних труб, які дозволили вперше дослідити та отримати аналітичний розв'язок задачі про

визначення напруженого стану у клейовому з'єднані при нерівномірному за коловою координатою силовому навантаженні.

Створено нові моделі статичного НДС з'єднань коаксіальних циліндричних оболонок, які дозволяють уникнути існуючих протиріч класичних моделей, що виникають внаслідок різних кривизн з'єднувальних поверхонь, а також отримано аналітичні розв'язки цих задач.

На основі двох уточнених моделей осесиметричного статичного НДС розглянуто з'єднання пластини з круглим отвором із концентричною накладкою та вперше отримано аналітичні розв'язки відповідних нових задач.

Отримано нові уточнені дані щодо характеру НДС клейових з'єднань у досліджених конструкціях, у тому числі у випадку наявності напливу клею поза зоною склеювання.

У цілому, це сприяло подальшому розвитку моделей клейових з'єднань

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів

Обґрунтованість та достовірність одержаних у дисертації результатів забезпечуються математичною коректністю постановок задач, використанням апробованих класичних методів механіки, математичної фізики, математичного аналізу та числових методів, відповідністю встановлених у дисертації закономірностей класичним уявленням про фізичну природу деформування з'єднаних елементів, коректним обґрунтуванням виявлених механічних ефектів, доведенням теоретичної збіжності результатів для ряду розглянутих задач, хорошою кореляцією теоретичних та отриманих за допомогою МСЕ числових результатів.

Практичне значення

Практична цінність отриманих результатів полягає, насамперед, у спрямованості роботи на встановлення міцності клейових з'єднань несучих тонкостінних конструкцій, що широко застосовуються в аерокосмічній техніці (відсіки ракет, з'єднання шпангоутів з обшивкою, структурні елементи композитних ферм тощо).

Крім того, результати, які отримані для клейових з'єднань пластини з отвором і накладки, можуть бути застосовані для удосконалення процедур ремонту пошкоджень обшивки.

Практичне значення одержаних результатів підтверджено довідками про використання результатів роботи на ДП «Антонов» та в навчальному процесі

кафедри технології виробництва літальних апаратів, кафедри проектування літаків і вертолітів і кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Апробація та повнота опублікування основних результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних семінарах та конференціях, а також на засіданні науково-технічної проблемної ради «Математичне моделювання. Механіка деформівного твердого тіла. Динаміка та міцність машин» Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України і отримали схвальну оцінку.

За результатами проведених досліджень опубліковано 13 робіт, серед яких 6 статей та 7 матеріалів тез доповідей. У виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus опубліковано 6 робіт.

У цілому матеріали дисертації досить повно висвітлені в опублікованих статтях та пройшли достатню апробацію на міжнародних наукових конференціях.

Зauważення до дисертації

До дисертаційної роботи існують деякі **зауваження**:

1. У роботі переважно досліжується напружений стан клейових з'єднань, узгоджених за геометричними розмірами несучих елементів, без урахування впливу частин, що знаходяться поза зоною склеювання. Якщо у спрощених постановках, у яких враховується робота несучих елементів тільки на розтяг, це припустимо, то для задач із врахуванням згину – потребує пояснення. Найбільший згин спостерігається не в зоні склеювання, де сумарна згинна жорсткість клейового з'єднання значно більша, ніж кожного несучого шару, а поза цією зоною, що підтверджується даними, наведеними на рис. 4.12. Врахування згину частин несучих елементів поза зоною склеювання може привести до зміни величини та характеру розподілу напружень у клейовому шарі.
2. Для дослідження клейових з'єднань круглих ремонтних накладок із пошкодженою пластиною автор застосував дві уточнені моделі, які базуються на гіпотезі Фолькерсена та Голанда-Рейснера. На жаль, у роботі відсутні пряме порівняння можливостей цих моделей та рекомендації щодо ефективного застосування кожної з них.

3. На стор. 77 дисертації автор ставить математичну задачу про переміщення закінцівок з'єднань, але жодних числових результатів, одержаних за власною моделлю, для неї не наводить.
4. При визначенні параметрів осередненої жорсткості клейового шару автор використовує різні залежності, у яких враховується вплив тільки клейового шару (формула (2.19)) або ж вплив жорсткості усіх з'єднувальних шарів (формула на стор. 62). Слід пояснити використання різних залежностей у задачах.
5. У задачі про клейове з'єднання двох пластин у аналітичному розв'язку використовується розвинення не по ортогональній повній системі функцій Y_n . Для полегшення аналізу збіжності автор використовує умову нормування (2.13), можливість введення якої потребує уточнення. Згідно з даними, наведеними на рис.2.2 та рис.2.3, при збільшенні індексу n збільшується максимальне значення та кількість осциляцій функцій Y_n . На жаль, автор не навів пояснень щодо кількості функцій, які дозволили отримати збіжність результатів.
6. У більшості розділів автор розглядав лише модельні задачі. Робота сприймалася б ще краще, якби автор навів приклади числових розв'язань реальних задач, у тому числі із аналізом міцності клейових з'єднань.
7. Не достатньо чітко сформульована новизна роботи. А також у дисертації наявні окремі описки у формулах, малюнках, а також помилки в тексті.

Зазначені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку даної дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та вірогідності основних результатів та висновків.

Висновки

У цілому вважаю, що дисертаційна робота К. П. Барахова є завершеним науковим дослідженням. Тексти дисертації та автореферату викладені на належному науковому рівні, їх оформлення здійснено згідно з відповідними вимогами. Зміст автореферату повністю відповідає змісту роботи та є ідентичним основним її положенням. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають поставленій меті.

Робота задовольняє вимогам пунктів 9, 11, 12, 13, 14 діючого «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р.

(зі змінами та доповненнями згідно Постанов № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016). Вважаю, що автор дисертації, Барахов Костянтин Петрович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

В.о. ученого секретаря

Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

С. В. Угрімов

Підпись засвідчує,
Заступник директора з наукової роботи,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



К.В. Максименко-Шейко