

ВІДГУК

офіційного опонента, старшого наукового співробітника кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О. О. Морозова Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), доктора технічних наук Ткачука Миколи Миколайовича на дисертацію Барахова Костянтина Петровича **„СТАТИЧНИЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КЛЕЙОВИХ З’ЄДНАНЬ ВНАПУСК”**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації.

Застосування клейових з’єднань постійно розширюється в різноманітних галузях техніки. Зокрема, в аерокосмічній галузі саме ця технологія з’єднання конструктивних елементів із самого початку мала надзвичайно велике значення. Відповідно, розробка нових виробів, в яких ця технологія використовується, вимагає аналізу напружено-деформованого стану поєднаних елементів конструкції, з одного боку, а також міцності самого клейового шва, з іншого боку. Метод скінченних елементів є цілком очевидним вибором для здійснення такого аналізу. Його можна застосовувати для моделювання тіл довільної складної форми, цей метод дає змогу враховувати нелінійний відгук матеріалів на навантаження, а також скінченні деформації тіл. Водночас, попри універсальність скінченноелементний аналіз вимагає прискіпливої підготовки розрахункових моделей та загалом може виявитися витратним з точки зору обчислювального обсягу. Останній аспект може бути критичним за умов здійснення багатоваріантних досліджень, коли виникає необхідність дослідити задачу неодноразово за різних параметрів конструкції. З огляду на це, може бути виправданим застосування спеціальних методів аналізу для окремих релевантних випадків. Саме розробленню таких методів і моделей присвячена дисертаційна робота Барахова К.П. Досліджуються окремі випадки клейових з’єднань тонкостінних елементів, для кожного із яких побудовано напіваналітичні розв’язки. Ви-

бір цих частинних задач зумовлено конкретними конструкційними рішеннями, які застосовують у вітчизняній аерокосмічній галузі, що зумовлює актуальність і практичне значення цієї роботи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Автором дисертації здійснено глибокий і всебічний аналіз теоретичних моделей клейових з'єднань а також чисельних і аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану багат шарових конструкцій. Було зроблено обґрунтовані висновки стосовно меж застосовності моделей тонких податливих шарів для досліджуваних випадків. Приділена значна увага усуненню протиріч основних спрощуючих припущень щодо характеру напруженого стану в клейовому шарі та їхньою сумісністю із обраними теоретичними моделями деформування пластин і оболонок. Метою і задачею дисертаційних досліджень було визначено із урахуванням виявлених проблемних питань, що не знайшли розв'язання попередніми дослідниками.

Запропоновані автором математичні формулювання засновані на перевірених теоретичних моделях та є достатньою мірою строгими. Для кожного окремого випадку отримані системи рівнянь у частинних похідних відносно невеликої кількості змінних напружено-деформованого стану. Для цих рівнянь побудовані аналітичні розв'язки за допомогою стандартних методів математичної фізики. Для перевірки точності отримуваних результатів було здійснено порівняння із даними скінченноелементного аналізу. На конкретних прикладах продемонстровано, що за відносно невеликих обчислювальних витрат можна швидко досягти задовільного рівня похибки. Достатня деталізованість запропонованої математичної моделі дала змогу зробити обґрунтовані висновки стосовно якісних особливостей напружено-деформованого стану клейових з'єднань, зокрема щодо нерівномірності розподілу напружень у податливому шарі в наведених прикладах.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням автором математичного апарату механіки суцільного деформованого тіла та теорії пласт-

тин і оболонок, методів розв'язання систем диференціальних рівнянь у частинних похідних, а також напіваналітичних методів математичної фізики.

Таким чином, наукові положення, сформульовані у дисертації, достатньо коректні, результати – достовірні, а висновки та рекомендації, сформовані на їх основі – обґрунтовані.

Робота має безпосередній зв'язок з науковими програмами, планами, темами, зокрема, вона втілена при здійсненні наукових досліджень в рамках науково-дослідної держбюджетної теми «Розвиток математичних методів дослідження прикладних задач», державний реєстраційний номер теми 0119U002517.

Мета і завдання дослідження сформульовані задовільно та відповідають заявленій темі, однак викладені дуже узагальнено. У формулюванні мети, на мою думку, замість «..математичних моделей статичного НДС..» варто було б вжити вираз «..математичних моделей деформування..». Варто було б розшифрувати, про які саме «..нові крайові умови..» (п.1) або «..нові моделі осесиметричного статичного НДС..» (п.3) йдеться в роботі. Зазначу, що в авторефераті та рукописі дисертації є незначні розбіжності у формулюванні мети та завдань дослідження.

Об'єкт та предмет дослідження відповідають темі, меті та завданням, а також подальшому змісту, викладеному в основних розділах дисертації. Під фразою «методи розв'язання відповідних задач механіки» слід розуміти саме «задачі визначення статичного напружено-деформованого стану», як це точно відображено в назві дисертації.

Здобувач продемонстрував глибоке володіння методами математичного моделювання та чисельного розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Положення наукової новизни в цілому сформульовані задовільно. Проте знову не вистачає конкретики в частині виокремлення нових результатів автора, що відрізняють його роботу від попередніх досліджень у цій області. Уточнення змісту «нових» положень роботи змушує звертатися до тексту основних розділів.

Практичне значення результатів роботи незаперечне. Досліджені автором

типи з'єднань та різноманітні схеми навантаження тонкостінних елементів мають відповідність до реальних конструкцій, що зустрічаються на практиці. Тим більше є прикритим, що в роботі недостатньо висвітлені ці паралелі, та не вказані конкретні вироби, до яких ці результати можна було би застосувати. Разом із цим відсутність прикладів із реальними числовими параметрами, як то геометричні розміри з'єднаних елементів, товщини клейового шару, а також чітко зазначеними механічними властивостями матеріалів, перешкоджає повноцінному сприйняттю практичної значимості. Достатньо було б вказати дійсні величини напружень у фізичних одиницях виміру для декількох практично релевантних випадків. Втім, якісні результати щодо характеру напружено-деформованого стану продемонстровані наочно і докладно. Їхнє значення для вироблення рекомендацій щодо конструкцій із клейовими з'єднаннями тонкостінних елементів беззаперечне. Слід сподіватися, що прикладний аспект роботи розкрито повною мірою під час заявленого впровадження її результатів на ДП «Антонов» у дослідницькій роботі кафедри технології виробництва літальних апаратів, кафедри проектування літаків і вертольотів і кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Із аналізу змісту роботи і публікацій, а також із виступів на конференціях та особистого спілкування можна зробити висновок, що дисертаційні дослідження здійснені здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертаційної роботи має широкі географічні та хронологічні рамки. Вони оприлюднені на багатьох конференціях упродовж періоду здобуття наукової кваліфікації.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано у 13 наукових працях: 6 статей у наукових виданнях (дві одноосібного авторства), 7 тез доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій. 6 публікацій індексуються наукометричною базою SCOPUS.

Таким чином, за кваліфікаційними ознаками дисертація відповідає спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, а за рівнем – ступеню канди-

дата наук.

Дисертація складається з титульного аркушу, анотацій, змісту, вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації складає 139 сторінок. Список використаних джерел містить 141 найменування на 16 сторінках. Дисертація містить 46 рисунків та два додатки на 4 сторінках.

У вступній частині обґрунтовано актуальність, важливість і новизну теми, міститься загальна характеристика роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено основні напрямки та методи їх розв'язання, викладено положення, що визначають наукову новизну і практичне значення роботи, описана її структура.

У першому розділі автор здійснює аналіз моделей напружено-деформованого стану клейових з'єднань внапуск. Основна увага приділена порівнянню одновимірних моделей Фолькерсена та Голанда – Рейсснера. Приділено увагу недолікам і обмеженням цих моделей, а також шляхам їхнього уточнення. Також обговорюються запропоновані попередніми дослідниками варіанти застосування альтернативних моделей тонкостінних елементів порівняно до цих двох класичних теорій. Автором здійснено змістовний огляд багатьох інших аспектів напруженого стану клейових з'єднань, зокрема впливу надлишків клею по краях з'єднання.

Також розглянуто можливості скінченноелементного аналізу на прикладі численних робіт інших авторів, зокрема і таких, які природно залишились поза межами дисертаційних досліджень.

У другому розділі розроблена двовимірна математична модель статичного деформування клейового з'єднання внапуск двох прямокутних пластин. Запропоновано формулювання задачі, яке відрізняється нестандартними схемами навантаження та закріплення пластин. Для обох випадків сформульована ідентична система диференціальних рівнянь у частинних похідних, а також отримано відповідні крайові умови. Наближений розв'язок цієї задачі шукається у вигляді ряду, коефіцієнти якого визначаються методом найменших квадратів. Цей розв'язок продемонстровано на прикладі модельної задачі, отримані розподіли дотичних напружень у

клеєвому шарі. Кількісно та якісно ці результати збігаються із даними скінченно-елементного аналізу. Попри вказані розбіжності гіпотез двовимірної моделі щодо рівномірності дотичних напружень у з'єднаних пластинах, автором не здійснено оцінки значущості цієї похибки та не запропоновано шляхів її усунення в межах свого підходу.

У третьому розділі розроблено моделі статичного деформування клеєвого з'єднання внапуск двох циліндричних оболонок. Розглянуто дві постановки. Перша передбачає з'єднання двох товстостінних циліндрів, радіальним вигином яких пропонується знехтувати. Таке припущення дає змогу розв'язати задачу за відсутності осьової симетрії, наприклад неоднорідних крайових умов на торцях циліндрів. Друга постановка обмежена осесиметричним навантаженням, однак вона передбачає вигин тонких оболонок. Слід відзначити успішно розв'язану здобувачем задачу побудови системи функцій розкладу шуканих невідомих у першій математичній моделі. Крім того, у другому формулюванні було обґрунтовано уточнено гіпотезу щодо розподілу дотичних зусиль у клеєвому шарі.

У четвертому розділі подано осесиметричні моделі клеєвого з'єднання пластини, що має круговий отвір, із концентричною круглою накладкою. Запропоновано два формулювання. У першому формулюванні розглянуто лише деформації в площині паралельній пластині. У другому враховано вигин та поперечні переміщення пластини та накладки. Обидва розв'язки за різними моделями порівнюються із спільною скінченноелементною моделлю.

У висновках описані основні наукові результати, отримані здобувачем, з виокремленням відмінностей та переваг над результатами інших дослідників.

Оцінюючи рукопис дисертації Барахова К.П. в цілому, слід зазначити, що матеріали досліджень викладені послідовно та логічно. Термінологія в основному залучається загальноприйнятна. У роботі міститься достатня кількість ілюстрацій, що дає змогу чітко сприймати зміст. Стиль викладу матеріалу зрозумілий та доступний.

Автореферат дисертації повною мірою відображає зміст дисертації та дає до-

статне уявлення про основні її положення.

У роботі та в авторефераті містяться усі необхідні компоненти, передбачені чинними нормативними документами.

До дисертації, крім зазначених вище, можна зробити низку зауважень.

1. Формулювання мети і завдань дослідження у підрозділі 1.5 не містить обґрунтування вибору тих задач, які розв'язуються в роботі. Попри наведену аргументацію, це не витікає з аналізу літератури. В цілому не вистачає огляду роботи, в якому було б надано пояснення зв'язку між окремими частинами. Це істотно знижує методологічну єдність.

2. Велика частка змістовного обсягу рукопису займають одержання аналітичних співвідношень. Зокрема сторінки зі 108 по 111 містять виключно непонумеровані формули, які без шкоди для цілісності викладення матеріалу можна було б вивести у додаток.

3. У деяких із прикладів, що демонструють запропонований метод аналізу, наведені параметри включно із механічними властивостями матеріалів склеюваних пластин та оболонок, а також самого клейового шва. При цьому не в кожному з них згадується, про які саме типи матеріалів йдеться, та в яких конструкціях можна зустріти подібні з'єднання.

4. Деякі результати подані частково в безрозмірних величинах. Наприклад на рис. 2.4 розподіл дотичних напружень віднесено до величини поздовжнього зусилля. Водночас осі координат подані в абсолютних значеннях. При цьому на рис. 2.10 усі змінні подано в безрозмірному вигляді. На противагу, результати скінченноелементного аналізу, з якими порівнюються запропоновані аналітичні розв'язки, переважно подані в абсолютних величинах. Така непослідовність заважає сприйняттю результатів. Згадки про те, що розподіли дотичних або нормальних напружень подаються відносно певного базового множника, наприклад на рис 3.12, повністю відсутні в тексті. Контурний графік на рис. 2.5 взагалі подано без шкали.

5. У третьому розділі для задачі з вигином циліндричних оболонок не надано переконливого пояснення приведенню дотичних зусиль, що діють на зовнішню та

внутрішню оболонку до серединної лінії клейового шару. Відповідно походження параметрів s_1 та s_2 , а також уточненої жорсткості клейового шару на зсув не розкрито достатньою мірою. Робота [135], на яку посилається здобувач в тексті, також не містить відповіді на це питання. Так само неочевидним є співвідношення (3.22) для дотичних напружень в клейовому шарі.

6. У четвертому розділі робиться висновок, що накладка розвантажує отвір. При цьому порівнюються два напружених стани за відсутності та за наявності накладки. Більш коректно для їхнього порівняння було б використати певну міру напружень, наприклад еквівалентні напруження фон Мізеса. Без цього некоректно стверджувати, що один тензор напружень є меншим за інший.

7. Перевірку побудованих здобувачем розв'язків за двома формулюваннями з урахуванням та без урахування вигину пластини та накладки здійснено для двох окремих прикладів. Параметри задачі на сторінці 95 є дещо відмінними від аналогічних параметрів на сторінці 112. Цьому не надано жодних пояснень. Залишається лише здогадуватися, що за менших розмірів отвору та накладки вигин буде менш істотним, а отже і перше формулювання продемонструє кращу узгодженість із результатами скінченноелементного моделювання.

8. У висновках не міститься практичних рекомендацій щодо використання розроблених моделей та методів, а також відсутні чисельні показники.

Вказані зауваження і недоліки можуть слугувати підґрунтям для розгорненої дискусії під час захисту дисертаційної роботи, але не знижують загальної позитивної оцінки дисертації

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам.

Дисертаційна робота Барахова К.П. є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати – моделі деформування клейових з'єднань пластин і оболонок внапуск і аналітичні методи аналізу їхнього статичного напружено-деформованого стану. Отримані розв'язки для декількох практично важливих випадків клейових з'єднань тонкостінних елементів конструкцій, встановлено особливості розподілу напружень в клейовому шарі. Ці результати знайшли засто-

сування в науці і техніці, зокрема у аерокосмічній галузі України.

Це дає змогу зробити висновок про те, що дисертаційна робота «Статичний напружено-деформований стан клейових з'єднань внапуск» повністю відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 р. № 567, а її автор, Барахов Костянтин Петрович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,
старший науковий співробітник
кафедри інформаційних технологій та систем
колісних і гусеничних машин імені О. О. Морозова
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
д.т.н.



Микола ТКАЧУК

Підпис
Миколи ТКАЧУКА
засвідчую:

В. о. проректора з наукової роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



Руслан КРИВОБОК