

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Данільцева Віктора Володимировича

«Міцність конструкцій зі склопластику з міжшаровими дефектами структури матеріалу», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми.

Тема дисертаційної роботи «Міцність конструкцій зі склопластику з міжшаровими дефектами структури матеріалу» безперечно актуальна, тому що присвячена розробці методики з розрахунків багатошарових елементів конструкцій на міцність та граничний стан з урахуванням різного роду початкових дефектів структури матеріалу. До таких конструкцій можна віднести склопластикові труби та елементи їх з'єднань

Високі показники питомої міцності і жорсткості волокнистих композиційних матеріалів разом з хімічною стійкістю, порівняно малою вагою та іншими властивостями, зробили ці матеріали привабливими для виготовлення трубопроводів різного призначення. Застосування склопластикових труб взамін металевих збільшує термін служби трубопроводів майже в 4 рази, приблизно в 3 рази знижує вагу трубопроводу.

Склопластикові труби на епоксидному в'язучому здатні витримувати тиск до 24 МПа. Максимальна температура експлуатації досягає 130°C. Склопластикові труби на основі епоксидних смол мають безліч переваг. Волокно, просочене епоксидною смолою, не піддається корозії і тому не вимагає ізоляції (внутрішньої або зовнішньої), хімічних інгібіторів, катодного і анодного захисту. Ще однією перевагою є збільшення терміну служби насосів і іншого вмонтованого в трубопровід устаткування через повну відсутність у потоці часток іржі. Низька теплопровідність таких труб зменшує втрати тепла із системи трубопроводів, внаслідок чого в багатьох випадках зникає необхідність в ізоляції.

Більша частина випадків руйнування конструкцій склопластикових труб пов'язана з низькою міцністю механічних і адгезійних (клейових) з'єднань їхніх окремих елементів. Труби і деталі сполучень зі склопластику виготовляються під стикові з'єднання наступних типів: фланцеві, бугельні, бандажні або муфтові, раструбні, різьбові.

Аналіз ефективності різних типів з'єднань доводить, що до основних переваг адгезійних з'єднань у порівнянні з їхніми механічними аналогами варто віднести: меншу концентрацію напружень, зниження маси з'єднання, мала ймовірність поширення тріщин. Основний недолік клейових з'єднань – низька міцність клейового шару при деформаціях зсуву та трансверсального відриву.

Під час виготовлення й експлуатації багатошарових конструкцій, до яких можна віднести склопластикові труби, на міжшарових поверхнях контакту жорстких армованих шарів утворюється тонкий клейовий прошарок, а також різного

роду структурні недосконалості, наприклад, ділянки непроклею або відшарувань. Специфічними особливостями багатошарових конструкцій з композитних матеріалів є різко виражена анізотропія їх властивостей, відносно низький опір попереочним та трансверсальним деформаціям, істотна відмінність механічних і теплофізичних характеристик шарів.

Тому розробка нових методик розрахунку напружено-деформованого стану багатошарових конструкцій з дефектами структури на основі уточненої дискретно-структурної теорії, коли враховуються адекватні кінематичні та статичні умови контактної взаємодії суміжних поверхонь сполучених шарів під час дії як статичного, так і температурного навантаження визначає актуальність проведених досліджень.

Отримані в роботі наукові результати дозволяють під час проектування конструкцій із композиційних матеріалів значно поліпшити техніко-економічні показники таких конструкцій, а також удосконалити технологію їх виробництва.

Наукова новизна.

Наукова новизна виконаної дисертації перш за все полягає в тому, що автором роботи проведено обґрунтування моделей розрахунку напружено-деформованого та термопружного стану багатошарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури. Розроблені алгоритми, програми, методики досліджень та отримані на їх основі теоретичні та експериментальні результати показали наявність нових особливостей деформованого стану розглянутих конструкцій.

Створено методику дослідження термопружного стану багатошарових оболонок обертання, коли на одній частині поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування). Побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування багатошарової композитної оболонки, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву, забезпечити умови механічного і теплового сполучення шарів і умови термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки.

Розроблено та апробовано методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури. Запропоновано ефективний алгоритм визначення теплового коефіцієнтів лінійного розширення та теплопровідності для багатошарового анізотропного матеріалу. Що дозволило на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла розробити чисельно-аналітичний підхід розв'язання термопружних незв'язних крайових задач для циліндричних товстостінних оболонок за умови як ідеального, так і неідеального контакту суміжних шарів по сполученим поверхням.

Розроблено та апробовано методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури. Запропоновано ефективний алгоритм визначення теплового коефіцієнтів лінійного розширення та теплопро-

відності для багат шарового анізотропного матеріалу. Що дозволили на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла розробити чисельно-аналітичний підхід розв'язання термопружних незв'язних крайових задач для циліндричних товстостінних оболонок за умови як ідеального, так і неідеального контакту суміжних шарів по сполученим поверхням.

Розв'язано задачу конструкційної міцності і створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багат шарових циліндричних оболонок, досліджено напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань.

Створено методику визначення граничного гідростатичного тиску ремонтних композитних бандажів, виготовлених шляхом багат шарового намотування склотканини на трубу з одночасним її просочуванням у місці дефекту.

Виконана дисертаційна робота дає подальший розвиток наукових основ теорії з розрахунків багат шарових елементів конструкцій на міцність та граничний стан з урахуванням різного роду початкових дефектів структури матеріалу.

Робота Данільцева В.В. має всі необхідні ознаки наукової новизни кандидатської дисертації. У цій частині дисертація цілком відповідає встановленим для таких робіт вимогам.

Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень дисертаційної роботи.

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням апробованих методів розв'язання крайових задач, фізично обґрунтованих моделей конструкцій і матеріалів, доброю кореляцією теоретичних результатів як з отриманими в роботі, так і наведеними в літературних джерелах експериментальними і теоретичними даними.

Теоретичні і експериментальні дослідження виконані на високому науковому рівні.

Усе вище викладене дозволяє вважати всі основні положення дисертації обґрунтованими, а отримані результати – достовірними.

Практична цінність роботи.

У роботі, що рецензується, автором на основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено методику з визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури та розв'язок задачі конструкційної міцності композитів з міжшаровими дефектами. Теоретичні методи визначення пружних властивостей і оцінки міцності композиційних матеріалів дозволяють зменшити обсяг трудомістких експериментальних досліджень.

Створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багат шарових циліндричних оболонок, а також наведені результати досліджень конструкційної міцності склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань, що має важливе значення для безпечної експлуатації трубопроводів з композиційних матеріалів.

Отримані результати дозволяють забезпечити більш інтенсивне впровадження нових композиційних матеріалів в різні галузі сучасної техніки, а також під час проектування конструкцій із композитів значно поліпшити техніко-економічні показники таких конструкцій і удосконалити технологію їх виробництва.

Результати досліджень впроваджені в практику науково-дослідних і проектних робіт в ході виконання європейського гранту «Innovative nondestructive testing and advanced composite repair of pipelines with volumetric surface defects» № PIRSES-GA-2012-318874 в рамках 7-ої рамкової програми Європейського Союзу та прикладної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України. Отримані відповідні акти впровадження.

Загальна характеристика роботи.

У вступі автор обґрунтовує актуальність обраної теми, ставить мету і завдання дослідження, а також приводить дані з апробації роботи, її зв'язок з науковою тематикою, структурі та публікаціях.

У першому розділі розглянуто достатньо велику кількість робіт стосовно теорії багатошарових тонкостінних конструкцій з композиційних матеріалів, включно фундаментальні і оглядові, у тому числі іноземних авторів. Розглянуті критерії міцності різного походження. Наданий огляд конструкторсько-технічної документації з проектування, виготовлення й експлуатації склопластикових труб та різних варіантів їх з'єднань, виконаних у формі багатошарових оболонок обертання, та сучасного стану проблеми розрахунку склопластикових труб на їх конструкційну міцність і несучу здатність. Проведений аналіз різних розрахункових моделей і методик розрахунку багатошарових елементів конструкцій з дефектами структури від дії статичних та температурних навантажень.

Опис методів базується на традиційному розділенні на теоретичний, експериментальний і комбінований напрями. Всі методи детально розглянуті, вказано авторство найбільш значущих розробок. Особлива увага приділена енергетичним і чисельним методам. Серед чисельних методів виділений найбільш перспективний сучасний напрям, який базується на методі скінченних елементів.

Проведений аналіз доводить, що більшість робіт з міцності конструкцій із дефектами структури типу непроклею або розшарувань виконана, як правило, у рамках наближених розрахункових схем. Через складність числової реалізації розглянутих задач переважна частина публікацій з питань міцності багатошарових оболонок із дефектами структури мають більш теоретичний характер. Практично відсутні роботи, у яких проводяться розрахунки на конструкційну міцність і граничний стан склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань.

На основі цього аналізу проведено обґрунтування і уточнення цілей роботи. В цілому аналіз літературних джерел є дуже переконливим.

Другий розділ присвячено структуруванню й узагальненню рівнянь дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок і пластин із дефектами структури матеріалу по товщині. Побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного дефор-

мування багатошарової композитної оболонки, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву, забезпечити умови механічного і теплового сполучення шарів і умови термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки.

Для розв'язання контактної крайової задачі у змішаній формі складена система диференціальних рівнянь дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок. Статичні умови контакту по лицьових сполучених поверхнях сусідніх шарів виконуються за допомогою методу штрафних функцій. Якщо оболонка обертання містить n шарів зі співвісними поверхнями, тоді розв'язувана система складається з $n \times 14$ диференціальних рівнянь у частинних похідних. Згідно з наведеним варіантом дискретно-структурної теорії розроблена розрахункова модель з наявністю неідеальних ділянок контакту сполучених поверхонь анізотропних шарів.

Для розв'язання задачі термопружності складені рівняння термопружності для багатошарової оболонки, яка складається з n -анізотропних криволінійних шарів з різними теплофізичними властивостями. Наведена задача термопружності вирішується без урахування впливу деформування конструкції на зміну поля температур і відноситься до класу незв'язаних задач теорії термопружності.

У третьому розділі у разі, коли композит є набором n по-різному орієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, запропонована методика визначення зведених пружних сталей та інтегральних термопружних характеристик, а також компонент матриці жорсткості розглянутого пакета шарів у цілому.

У композиційному матеріалі з регулярною структурою, як правило, присутні повторювані елементи у вигляді односпрямованих шарів. Зневажаючи неоднорідність структури на мікрорівні кожного шару, можна знайти ефективні характеристики окремих шарів на макрорівні. Пружні характеристики елементарного шару визначаються у два етапи. Спочатку визначають зведені пружні характеристики за рахунок усереднення пружних властивостей волокон ортогонально-армованого матеріалу шару та матриці. Вважається, що компоненти матеріалу (волокно і матриця) ізотропні, лінійно пружні та працюють спільно на всіх етапах деформування. Крім того, прийняті припущення, згідно яким: не враховуються напруження, перпендикулярні до волокон при дії нормального навантаження вздовж волокон; поперечні деформації при розтяганні та стисканні кожної компоненти пропорційні її об'ємному змісту в матеріалі; на границі волокно-матриця не розглядається концентрація напружень. На другому етапі здійснюється розрахунок характеристик односпрямованого ортотропного шару, виходячи із пружних властивостей волокон і модифікованої матриці. Слід зауважити, що розглядається об'ємний напружений стан односпрямованого шару.

У разі, коли композит є набором n по-різному направлених шарів односпрямованого матеріалу, створений алгоритм визначення інтегральних пружних характеристики розглянутого пакета шарів в цілому. Властивості матеріалів під час проектування конструкцій з композитів та можливі варіанти схем їх армування досить різноманітні. Тому теоретичне визначення фізико-механічних характеристик композиційного матеріалу при мінімальних витратах на експеримент є актуальним завданням.

Розроблено та апробовано методику визначення інтегральних термопружних

характеристик композитів шаруватої структури. Запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів теплового лінійного розширення та теплопровідності багатошарового анізотропного матеріалу. Під час визначення зазначених коефіцієнтів вважається, що між вектором теплового потоку та градієнтом температури у всіх фазах композиції виконується лінійний закон теплопровідності Фур'є. Крім того, на границях армуючих елементів та матриці, а також на границях сусідніх односпрямованих шарів, реалізується ідеальний термомеханічний контакт (безперервність полів температур, переміщень і векторів теплових потоків).

Порівняння отриманих результатів та аналогічних даних, наведених у відомих публікаціях, підтверджує коректність запропонованої методики визначення інтегральних фізико-механічних характеристик багатошарового композита.

У четвертому розділі розроблена експериментальна методика для перевірки достовірності теоретичних результатів і оцінки похибок, які вносять різного роду допущення в розрахунки на міцність елементів з міжшаровими дефектами. Наведено фізико-механічні характеристики основних компонент склопластику – скловолокна і зв'язуючих матеріалів, надано стислий опис технології виготовлення зразків.

Створено експериментальні установки, які були розроблені і виготовлені для проведення випробувань: кільцевих зразків, труб зі склопластику, і сталеві труби з дефектам, посиленої склопластиковим бандажем. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень. Конструкції експериментальних установок дозволяють проводити виміри прогинів зразків за допомогою індикаторів годинникового типу з точністю вимірювань до $0,5 \cdot 10^{-5}$ м. Вимірювання відносних деформацій проводиться методом тензометрії.

Для оцінки достовірності результатів, отриманих на основі запропонованої експериментально-теоретичної методики, додатково були проведені гідростатичні випробування склопластикових труб. При цьому досліджувалися несуча здатність експериментальних зразків та вплив жорсткості сталевих фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань, конструкційна міцність муфтових та бандажних клейових з'єднань, граничний тиск, який витримує сталеві труби з дефектами матеріалу на лицьовій поверхні (іржі), посиленої бандажем зі склопластику.

Порівняння експериментальних даних із теоретичними результатами дозволило зробити висновок, що в результаті порівняно низької жорсткості склопластиків на згинання і слабкого опору деформаціям поперечного зсуву, застосування традиційної структурно-безперервної теорії моделі розрахунку тонкостінних армованих елементів конструкцій навіть на початковій стадії навантаження призводить до значних похибок.

У п'ятому розділі розв'язано задачу конструкційної міцності і створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багатошарових циліндричних оболонки, досліджено напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань. Відзначається, що руйнування муфтового з'єднання можливо через низьку граничну міцність клейового шару при деформаціях зсуву і відриву. Щоб забезпечити можливість перерозподілу навантажень між трубами, що з'єднують, і муфтою при внутрішньому тиску, потрі-

бно створити їх надійне зчеплення з подальшим спільним деформуванням труби та муфти за рахунок підвищення адгезійних властивостей клейового шару. Ці умови можна виконати, приймаючи конструктивні рішення в плані зміни форми муфти та способів підготовки поверхні кінців труб, що з'єднують. Методом тензометрії досліджено деформований стан труб зі склопластику з дефектами структури матеріалу, фланцеві та клейові типи з'єднань таких труб. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів доводять адекватність обраної розрахункової моделі. Отримані за допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності теоретичні значення величин граничного тиску, при якому відбувається руйнування склопластикової труби в точках контакту її поверхні з металевими фланцями, дозволяють стверджувати, що застосування дюралюмінієвих фланців у порівнянні зі сталевими фланцями збільшують граничний тиск майже на 25%. Таким чином, варіюючи жорсткістю фланців, можна досягти оптимальних умов роботи розглянутої конструкції склопластикової труби. Методом тензометрії досліджено деформований стан труб зі склопластику з дефектами структури матеріалу, фланцеві та клейові типи з'єднань таких труб. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів доводять адекватність обраної розрахункової моделі.

Доведено, що за рахунок ефективного виконання композитних бандажів та визначення їх реальних фізико-механічних характеристик можна домогтися часткового або повного відновлення несучої здатності дефектної ділянки трубопроводу, і, хоча сталь усе ще може піддаватися пластичній деформації, її ступінь обмежується зовнішнім бандажем з композитного матеріалу, а цей фактор, в свою чергу, забезпечує безпеку трубопроводу при максимально припустимому робочому тиску.

Зауваження по дисертації і автореферату.

1. У другому розділі, який присвячений дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок і пластин із дефектами структури матеріалу по товщині, дуже докладно наданий алгоритм побудови розв'язувальної системи диференціальних рівнянь та відповідних крайових умов. Достатньо було б обмежитися записом розв'язувальної системи диференціальних рівнянь у змішаній формі та відповідних крайових умов з послідовним аналізом її особливостей, що суттєво скоротило б обсяг дисертації.
2. У третьому розділі при виконанні усереднення пружних властивостей волокон армованого шару застосовано наближений підхід, заснований на правилі сумішей. Похибка обчислення ефективних пружних характеристик не визначалась. Доцільно було б виконати порівняння з результатами, отриманими чисельними методами.
3. Для волокна і матриці в роботі використовувалася модель ізотропного пружного матеріалу. У разі використання вуглецевих волокон модуль пружнос-

ті в поздовжньому напрямку може значно перевищувати модулі пружності в поперечних напрямках. Для таких волокон потрібно використовувати модель трансверсально-ізотропного матеріалу.

4. В четвертому розділі дуже стисло наведене описання методики визначення модуля пружності та граничних характеристик кільцевих зразків методом розрізного диска, що не дає можливості визначитись з наявністю теоретико-експериментальної методики визначення границі міцності багат шарових композитів.
5. В дисертаційній роботі бажано було виконати порівняльний аналіз рішення деяких задач за допомогою комерційних програмних комплексів.

Заклучна оцінка дисертаційної роботи.

Дисертація Данільцева Віктора Володимировича «Міцність конструкцій зі склопластику з міжшаровими дефектами структури матеріалу» є закінченою науково-дослідною роботою, що містить наукові положення, які можна розглядати як вирішення важливого прикладного завдання. Реалізація результатів роботи буде сприяти подальшому розвитку машинобудівної, нафто та газодобувної галузей. Робота виконана на високому рівні, містить нові, цінні з наукової і практичної точки зору результати, написана технічно грамотною мовою. Результати роботи підтверджені актами про впровадження її результатів у виробництво, науково-дослідний та освітянський процес.

Дисертація відповідає спеціальності 05.02.09 - динаміки та міцності машин і вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор, Данільцев Віктор Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Завідувач кафедри динаміки і міцності машин
Національного технічного університету «ХПІ»,
доктор технічних наук, професор

Г. І. Львов

