

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Данільцев Віктор Володимирович



УДК 539.3

**МІЦНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ СКЛОПЛАСТИКА
З МІЖШАРОВИМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛА**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
ВЕРЕЩАКА Сергій Михайлович,
Сумський державний університет,
професор кафедри опору матеріалів та
машинознавства.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЛЬВОВ Геннадій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин;

кандидат технічних наук
ГАДЯКА Володимир Григорович,
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО»,
начальник відділу газодинаміки,
динаміки та міцності машин СКБ.

Захист відбудеться «06» жовтня 2016 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЛА, ауд. 213.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова 2.

Автореферат розісланий «5» вересня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 55.051.03, к.т.н., доц.



Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обсяг світового виробництва склопластикових труб (СПТ) становить більше 72 тис. км. У вартісному вираженні світовий ринок СПТ оцінюється в 14 360 млн. USD. Найбільшими споживачами СПТ є підприємства хімічної промисловості. На частку підприємств нафтогазової промисловості припадає 28 % світового споживання СПТ.

Інтенсивне впровадження нових композиційних матеріалів у різні галузі сучасної техніки, насамперед, викликано високими техніко-економічними показниками конструкцій, створених на їхній основі.

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 °С. 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 СПТ 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, малу ймовірність поширення тріщин. Основний недолік клейових з'єднань – низька міцність клейового шару при деформаціях зсуву та трансверсального відриву.

Під час виготовлення і експлуатації багатошарових конструкцій, до яких можна віднести СПТ, 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 поперечним та трансверсальним деформаціям, істотна відмінність механічних і теплофізичних характеристик шарів.

З урахування наведених особливостей деформування багатошарових елементів конструкцій можна стверджувати, що традиційно використовувані в розрахункових моделях оболонки і пластин із композиційних матеріалів умови неперервності переміщень і напружень (ідеального контакту) при переході від одного сусіднього жорсткого армованого шару до іншого не виконуються.

Через складність чисельного розв'язання розглянутих задач, отримані теоретичні результати потребують експериментальної перевірки, особливо, якщо досліджується несуча здатність багатошарових тонкостінних елементів конструкцій з урахуванням різного роду початкових дефектів структури матеріалу. 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. Через відсутність типових методик для розрахунку на міцність клейових з'єднань труб зі склопластикових матеріалів, рішення теоретичних й експериментальних завдань, які можуть виникнути при їхньому створенні, також уявляється актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної механіки і динаміки машин Сумського державного університету при виконанні робіт відповідно до координаційного плану Міністерства освіти і науки України та реалізована при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи: «Несуча здатність комбінованого газового балона високого тиску» (0110U004017).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку на міцність та граничний стан склопластикових труб з урахуванням міжшарових дефектів структури матеріалу, а також різних варіантів їх з'єднань.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації поставлені такі основні задачі:

- розробити методику дослідження термопружного стану багатошарових оболонок обертання, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування);

- побудувати замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування багатошарової композитної оболонки, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення, умови механічного і теплового сполучення шарів та термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки;

- створити методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури та запропонувати ефективний алгоритм визначення теплового коефіцієнтів лінійного розширення та теплопровідності для багатошарового анізотропного матеріалу;

- дослідити напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань;

- розв'язати задачу конструкційної міцності багатошарових циліндричних оболонок і створити методику визначення граничного внутрішнього тиску ремонтних композитних бандажів, виготовлених шляхом багатошарового намотування склотканини на сталеву трубу у місці дефекту з одночасним її просочуванням епоксидною смолою.

Об'єкт дослідження – процес деформування багатошарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури матеріалу та різних варіантів їх з'єднань.

Предмет дослідження – конструкційна міцність склопластикових труб, клейових та фланцевих з'єднань, сталевих труб з дефектами, підсилених ремонтним композитним бандажем.

Методи дослідження. Для розв'язання термопружної незв'язаної задачі застосовуються метод Фур'є, метод рядів Тейлора, метод ортогональної прогонки. На основі даних методів створений алгоритм і мовою програмування VISUAL FORTRAN складена програма розрахунку напружено-деформованого стану багатошарових циліндричних оболонок від дії статичного та температурного навантаження. Для розв'язання деяких із розглянутих задач також використовувався метод скінченних елементів, який реалізовано в програмному комплексі ANSYS.

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.

Наукова новизна одержаних результатів:

- складено повну систему розв'язувальних рівнянь дискретно-структурної теорії в змішаній формі для розв'язання контактної крайової задачі визначення напруженого стану багатошарових оболонок з міжшаровими дефектами структури матеріалу;

- створено методику дослідження термопружного стану багатошарових оболонок обертання, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування);

- розроблено теоретико-експериментальну методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури;

- експериментально досліджено деформований стан склопластикових труб та їх з'єднань з міжшаровими дефектами структури матеріалу методом тензометрування;

- розв'язано задачу конструкційної міцності і створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багатошарових 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 багатошарового намотування склотканини на трубу у місці дефекту з одночасним її просочуванням епоксидною смолою.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена методика 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;

- розроблений метод визначення граничного внутрішнього тиску від дії статичних та температурних навантажень, має важливе значення для безпеки експлуатації трубопроводів з композиційних матеріалів.

Теоретичні і числові результати дисертаційної роботи впроваджені в прикладних науково-технічних розробках щодо вдосконалення виробів із композиційних матеріалів: ТОВ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» м. Харків.

Запропоновані методи розрахунку зазначених крайових задач використовуються в навчальному процесі Сумського державного університету, для студентів напрямку підготовки «Механіка» та магістрів спеціальності «Комп'ютерна механіка».

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 у 7-й рамковій програмі Європейського союзу в НТУ «ХП». Отримані відповідні акти впровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом довготривалих досліджень автора з проблем міцності склопластикових труб з міжшаровими дефектами структури. Дані до захисту основних положень дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. У публікаціях, виданих у співавторстві, здобувачу належать наступні наукові результати:

[1–3] – аналіз останніх публікацій стосовно розглянутого питання;

[4] – теоретичне обґрунтування розрахункової моделі під час розрахунків на міцність склопластикових труб у зоні фланцевих з'єднань;

[5–10] – теоретичне обґрунтування розрахункових моделей та складання алгоритмів для розв'язання розглянутих крайових задач та аналіз достовірності отриманих результатів шляхом експериментальних досліджень.

[11] – визначення розрахункової моделі багатошарової склопластикової труби;

[12] – варіант експериментального стенду безперервного намотування труб з композиційних матеріалів;

[13] – варіант експериментального стенду верстака для виробництва труб з армованих пластмас;

[14] – складення алгоритму і розв'язання крайової задачі термопружного деформованого під час з'єднання циліндричної товстостінної багатошарової оболонки та металевого фланця;

Апробація результатів дисертації. Зміст основних розділів і окремих результатів роботи доповідався на наступних конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції “Технологія ХХІ века” (Южне, 2014), 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2015), 5-й міжнародній конференції (м. Мінськ, Беларусь, 2015), міжнародних спеціалізованих виставках – конференціях “Композити і склопластики” (Запоріжжя, 2009 – 2016 рр.).

У повному обсязі робота обговорювалася на семінарі кафедри “Загальної механіки та динаміки машин” Сумського державного університету (Суми, 2016 р.), на семінарі кафедри “Динаміки і міцності машин” Харківського національного технічного університету “ХП” (Харків, 2015 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових робіт, серед яких 9 статей у наукових журналах, що входять до переліку фахових видань України, 1 публікація – в зарубіжному періодичному фаховому виданні, 3 деклараційних патенти на винахід, 4 матеріалів і тез доповідей на наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел (190 найменувань), висновків, додатків (на 4 сторінках). Загальний обсяг дисертації становить 180 сторінок, 60 рисунків та 21 таблиця по тексту. Обсяг основного тексту дисертації становить 161 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані цілі й завдання досліджень, подана загальна характеристика роботи і викладені основні результати досліджень, показані їх наукова новизна і практична цінність.

Перший розділ містить 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.

Проаналізовані існуючі до сьогодні дослідження з проблем міцності та несучої здатності шаруватих тонкостінних конструкцій, які характеризуються більшою різноманітністю підходів, математичних моделей анізотропних конструкцій, а також методами їх розв'язання.

Відзначено, що вагомий внесок у розвиток класичної й уточнених неklasичних теорій анізотропних пластин та оболонок, обґрунтування запропонованих неklasичних моделей і встановлення зв'язку між ними і просторовими задачами теорії пружності містяться у працях вітчизняних і зарубіжних вчених: Н.П. Абовського, С.О. Амбарцумяна, І.Ю. Бабица, А.Т. Василенка, В.В. Васильєва, І.Н. Векуа, К.З. Галімова, О.Л. Гольденвейзера, Е.І. Григолюка, Я.М. Григоренка, О.Н. Гузя, М.О. Кільчевського, С.Г. Лехницького, О.В. Марчука, Х.М. Муштарі, Ю.В. Немировського, Ю.М. Неміша, Н.Д. Панкратової, Б.Л. Пелеха, В.В. Пікуля, В.Г. Піскунова, А.В. Плеханова, А.П. Прусакова, О.О. Расказова, А.Ф. Рябова, А.С. Сахарова, В.С. Сіпетова, М.А. Сухорольського, В.П. Тамужа, Г.О. Тетерса, І.Ю. Хоми, Л.П. Хорошуна, П. Нагді (P.M. Naghdi), Е. Рейснера (E. Reissner), С.І. Хатчинса (C.I. Hutchins), А.К. Нура (A.K. Noor), Н.Дж. Пейгано (N.J. Pagano), Дж.Н. Редді (J.N. Reddy) та інших.

Відмічено два протилежні підходи до побудови двовимірних рівнянь теорії шаруватих структур – структурно-безперервний (континуальний) і дискретно-структурний. При цьому зазначається, що дискретно-структурний підхід дозволяє враховувати локальні ефекти на поверхнях контакту шарів і, як правило, застосовується при розрахунках багатошарових конструкцій.

Моделюванням контактної взаємодії у рамках дискретно-структурної теорії як за умови ідеального, так і неідеального контакту шарів займалися: А.Я. Александров, В.А. Баженов, В.В. Болотін, Л.Е. Брюкер, Т. Василенко, Е.І. Григолюк, Я.М. Григоренко, В.І. Гуляєв, І. Зубко, А.В. Іванов, Б.Я. Кантор, В.Н. Кобелев, Ф.А. Коган, І.М. Коровайчук, Л.М. Куршин, В.А. Лазько, А.В. Максимук, О.П. Малишев, О.В. Марчук, М.В. Марчук, О.С. Мачуга, Ю.М. Новічков, В.В. Парцевський, Б.Л. Пелех, В.Г. Піскунов, Ю.Н. Тамуров, М.М. Хом'як, Л. Лібреску (L. Librescu), Т. Хаузе (T. Hause), А.К. Нур (A.K. Noor), Е. Рейснер (E. Reissner) та ін.

Зроблений огляд методів визначення й дослідження пружних властивостей композиційних матеріалів, а також критеріїв міцності. Зазначено два шляхи визначення ефективних характеристик композитів. Перший напрям є чисто феноменологічним, коли фізико-механічні сталі визначаються на основі лабораторних випробувань зразків з шаруватого матеріалу. Другий підхід базується на елементах структурного аналізу і передбачає визначення інтегральних фізико-механічних характеристик шаруватого композиту. Значний внесок в становлення, розвиток і обґрунтування зазначених теорій міститься у працях С.О. Амбарцумяна, А.Н. Андрєєва, О. М. Гузя, Л.Г. Білозерова, В.В. Болотіна, Г.А. Ваніна, В.В. Васильєва, Г.П. Зайцева, В.В. Захарова, В.Н. Кобелева, М.К. Кучера, О.К. Малмейстера, Ю.В. Неміровського, І.Ф. Образцова, Б.Л. Пелеха, Ю.Ю. Перова, Б.Є. Победрі, В.В. Серенсена, В.П. Тамужа, Ю.М. Тарнопольського, Г.О.Тетерса, Р.М. Крістенсена (R. M. Cristensen) та інших авторів.

Відмічено, що розрахунок багат шарових елементів конструкцій від дії температурних навантажень здійснюється на основі незв'язаної теорії термопружності я відповідно структурно-безперервного підходу в роботах: Н.А. Алфутова, В.В. Болотіна, І.Ф. Образцова, А.В. Острика, В.П. Павлова, В.М. Пестреніна, Ю.М. Работнова та інших.

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 багат шарових 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 аналізу літературних джерел у заключній частині першого розділу сформульовані висновки, що обґрунтовують актуальність теми дисертації та визначають напрямки проведення досліджень.

У другому розділі структуровані й узагальнені рівняння дискретно-структурної теорії багат шарових оболонок і пластин із дефектами структури матеріалу по товщині. Побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування багат шарової композитної оболонки, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення, забезпечити умови механічного і теплового сполучення шарів і умови термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки.

Багат шарова оболонка складається з n тонких анізотропних шарів. Кожен шар недеформованої оболонки віднесений до ортогональної криволінійної системи координат $\alpha_i^{(k)}$ ($i = 1, 2$), $z^{(k)}$. Координата $z^{(k)}$ спрямована вздовж нормалі $\vec{m}^{(k)}$ до серединної поверхні $S^{(k)}$ та еквідистантної поверхні $S_z^{(k)}$; k – номер шару. Індекс “ z ” при введенні інших символів означає, що відповідні величини належать до точки $(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, z^{(k)})$ еквідистантної поверхні $S_z^{(k)}$.

Вираз вектора повного переміщення $\vec{u}_z^{(k)}$ точки жорсткого шару відповідно до уточненої теорії оболонок С.П.Тимошенка має вигляд

$$\vec{u}_z^{(k)} = \vec{u}^{(k)} + z^{(k)}\vec{\gamma}^{(k)} + \varphi^{(k)}(z)\vec{\psi}^{(k)}, \quad (1)$$

де $\vec{u}^{(k)}$ – вектор переміщення точок серединної поверхні $S^{(k)}$; $\vec{\gamma}^{(k)}$ – вектор-функція кутів повороту та обтиснення волокон, перпендикулярних до недеформованої серединної поверхні $S^{(k)}$; $\varphi^{(k)}(z)$ – нелінійна безперервна функція розподілу тангенціальних переміщень по поперечній координаті; $\vec{\psi}^{(k)}(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)})$ – вектор-функція зсуву. Введення вектор-функції зсуву дозволяє врахувати нелінійний характер розподілу тангенціальних переміщень по товщині шару.

На основі варіаційного принципу Рейснера отримані рівняння рівноваги й фізичні співвідношення для анізотропного армованого шару оболонки, а також статичні та кінематичні умови контакту на лицьових сполучених поверхнях цього шару.

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.

Відомо, що між жорсткими шарами в процесі виготовлення армованих оболонок утворюється міжфазний м'який клейовий прошарок. Під час розрахунків вважається, що його товщина дорівнює нулю. Тоді відповідно до прийнятої моделі можливе пружне прослизання жорстких шарів один відносно одного, тобто на лицьових сполучених поверхнях виконуються тільки статичні умови контакту – напруження поперечного зсуву та обтиснення двох сусідніх шарів на поверхні контакту дорівнюють одне одному.

Рівняння рівноваги доповнюються статичними й кінематичними граничними умовами на відповідних частинах контуру. У випадку, коли між шарами оболонки кінематичні зв'язки відсутні, по поверхні сполучення цих шарів $S_z^{(k,k+1)}$ можуть виникати невідомі вектори зусиль $\vec{q}_{(k)}$, $\vec{q}_{(k+1)}$ контактної взаємодії. Для врахування впливу зусиль контактної взаємодії шарів у варіаційне рівняння принципу Рейснера додатково введений доданок, за допомогою якого враховується робота сил контактної взаємодії. Величина зони контакту визначається методом простих ітерацій.

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.

За допомогою зазначеного вище узагальненого варіаційного принципу Рейснера і дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок отримані рівняння термопружності в змішаній формі. Коли температурне поле не залежить від часу, запропоновано алгоритм розв'язку стаціонарної незв'язаної задачі теорії термопружності багатошарових оболонок.

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. Порівняння отриманих результатів та аналогічних даних, наведених у відомих публікаціях, підтверджує коректність запропонованої методики визначення інтегральних технічних параметрів багат шарового композита.

Як приклад в табл.1 наведені інтегральні фізико-механічні характеристики склопластику із заданим кодом армування.

Склопластик. Модуль пружності E_B і коефіцієнт Пуассона ν_B намотуваних стрічок, набраних з алюмоборосилікатних ниток, відповідно дорівнюють $E_B = 55000$ МПа, $\nu_B = 0,25$. Як матриця склопластику використовувався епоксидний полімер з наступними параметрами пружності: $E_M = 3550$ МПа, $\nu_M = 0,4$. У кожному односпрямованому шарі товщиною $0,157$ мм зміст, займаний стрічками, становить $V_B = 0,7$ від загального об'єму. Фізичні властивості: $\alpha_B = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_M = 45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – коефіцієнти лінійного теплового розширення волокна і матриці; $\lambda_B = 1,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_M = 0,133 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – коефіцієнти теплопровідності. Анізотропний пакет шарів склопластику складається з 21 односпрямованих шарів з кодом армування: $[45^\circ / 90^\circ / \pm 45^\circ / (0^\circ / 90^\circ)_2 / \bar{0}^\circ]_S$.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики анізотропного пакету шарів

Матеріал	E_{ij} , МПа	G_{ij} , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}	α_j , K^{-1}	λ_j , $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$
Склопластик	$E_z = 23980$	$G_{\theta z} = 11200$	$\nu_{z\theta} = 0,147$	$\nu_{\theta z} = 0,199$	$\alpha_z = 20,5 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_z = 0,507$
	$E_\theta = 32470$	$G_{rz} = 5636$	$\nu_{zr} = 0,338$	$\nu_{rz} = 0,198$	$\alpha_\theta = 14,9 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_\theta = 0,61$
	$E_r = 14040$	$G_{r\theta} = 6378$	$\nu_{\theta r} = 0,335$	$\nu_{r\theta} = 0,145$	$\alpha_r = 25,3 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_r = 0,332$

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 – скловолкна і зв'язуючих матеріалів, надано стислий опис технології виготовлення зразків.

Створені експериментальні установки, які були розроблені і виготовлені для проведення випробувань ТОВ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» м. Харків: кільцевих зразків (рис. 1, а), труб зі склопластику зі сталевими фланцями на торцях (рис. 2, а), і сталеві труби з дефектом, посиленої склопластиковим бандажем (рис. 3, а).

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 тензометрування.

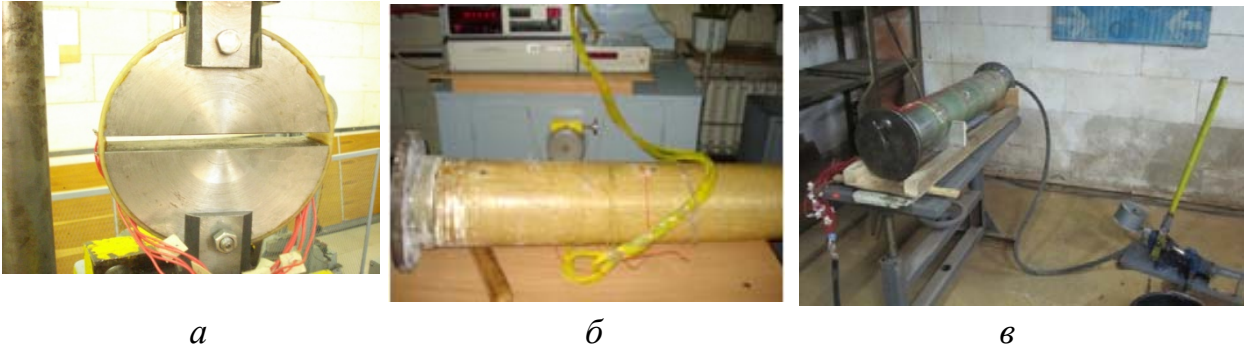


Рисунок 1 – Загальний вигляд експериментального устаткування:

a – навантаження кільцевого зразка методом розрізного диску; *б* – навантаження склопластикової труби з металевими фланцями на торцях; *в* – навантаження труби з бандажем для проведення гідростатичних випробувань

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 сталева труба з дефектами матеріалу на лицьовій поверхні (іржа), посиленої бандажем зі склопластику.

У п'ятому розділі на основі методу ортогональної прогонки С.К.Годунова розроблений алгоритм розв'язання задач міцності та несучої здатності тонкостінних осесиметричних конструкцій складної геометрії уздовж меридіана, який реалізовано на мові програмування VISUAL FORTRAN, створено методику дослідження термопружного стану багатошарових оболонок обертання, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування), розв'язано задачу конструкційної міцності і створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багатошарових циліндричних оболонок, досліджено напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні фланцевих, бандажних та муфтових з'єднань, розглянута задача відновлення несучої здатності дефектної ділянки сталевого трубопроводу за рахунок ефективного виконання композитних бандажів.

На основі класичної теорії пружності анізотропного тіла розроблений чисельно-аналітичний підхід розв'язання термопружних незв'язаних крайових задач для циліндричних товстостінних оболонок за умови як ідеального, так і неідеального контакту суміжних шарів по сполученим поверхням. Задача термопружного деформованого стану багатошарового циліндра, на кінцях якого виконуються умови вільного опирання, відповідно до дискретно структурної теорії розв'язується за допомогою розкладання невідомих переміщень і температури в ряди Фур'є в поздовжньому напрямі та в ряди Тейлора в радіальному напрямі. Отримана при цьому лінійна алгебраїчна система рівнянь включає $6N$ невідомих констант, N – кількість дискретних анізотропних шарів.

Геометричні параметри циліндричної оболонки: $r_a = 0,05\text{ м}$, $r_b = 0,06\text{ м}$ и $l = 0,05\text{ м}$. Нехай внаслідок тертя виникає теплове навантаження на внутрішній поверхні циліндру:

$$t_a(z) = \Delta t \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{\ell}\right), \quad t_b(z) = 0,$$

де $\Delta t = t_a(\ell/2) - t_b(\ell/2)$. Вважається, що зміна температурного навантаження на лицьових поверхнях оболонки дорівнює $-\Delta t = 80\text{ К}$.

Багатошарова оболонка складається з $N=3$ дискретних анізотропних шарів. Розглядається декілька варіантів таких циліндрів, виготовлених з композиційних матеріалів: вуглепластика, склопластику, боропластика і композитів на основі волокна кевлар-49. Всі три шари мають однакові пружні та фізичні властивості, які визначаються за методикою, запропонованої в главі 3.

Інтегральні характеристики дискретного шару композиційних матеріалів із заданими кодами армування наведені в табл. 2.

На рис. 2, 3 показані графіки розподілу осьових напружень σ_z та колових напружень σ_θ в точках розглянутого варіанту циліндра. Максимальні значення тангенціальних нормальних напружень виникають у середній частині оболонки, в точках внутрішньої лицьової поверхні. Так, наприклад, нормальні напруження в поздовжньому напрямку σ_z залежно від матеріалу оболонки змінюються від $\sigma_z = 31\text{ МПа}$ (склопластик) до $\sigma_z = 100\text{ МПа}$ (боропластик). В коловому напрямку напруження σ_θ у циліндрі з боропластика в 5 разів перевищують відповідні напруження, які виникають у циліндрі зі склопластику: $\sigma_\theta = 188\text{ МПа}$ (боропластик), $\sigma_\theta = 97\text{ МПа}$ (вуглепластик), $\sigma_\theta = 72\text{ МПа}$ (кевлар), $\sigma_\theta = 38\text{ МПа}$ (склопластик).

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики дискретних шарів оболонки

Матеріал	E_{ij} , МПа	G_{ij} , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}	α_j , К^{-1}	λ_j , $\text{Вт}/(\text{м}\times\text{К})$
Вугле- пластик	$E_z = 45390$ $E_\theta = 79210$ $E_r = 13700$	$G_{\theta z} = 12070$ $G_{r\theta} = 4113$ $G_{rz} = 3628$	$\nu_{z\theta} = 0,126$ $\nu_{zr} = 0,312$ $\nu_{\theta r} = 0,308$	$\nu_{\theta z} = 0,219$ $\nu_{rz} = 0,094$ $\nu_{r\theta} = 0,053$	$\alpha_z = 21,8 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_\theta = 11,7 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_r = 13,1 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_z = 4,114$ $\lambda_\theta = 7,239$ $\lambda_r = 0,285$
Скло- пластик	$E_z = 23980$ $E_\theta = 32470$ $E_r = 14040$	$G_{\theta z} = 11200$ $G_{rz} = 5636$ $G_{r\theta} = 6378$	$\nu_{z\theta} = 0,147$ $\nu_{zr} = 0,338$ $\nu_{\theta r} = 0,335$	$\nu_{\theta z} = 0,199$ $\nu_{rz} = 0,198$ $\nu_{r\theta} = 0,145$	$\alpha_z = 20,5 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_\theta = 14,9 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_r = 25,3 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_z = 0,507$ $\lambda_\theta = 0,61$ $\lambda_r = 0,332$
Композит на основі волокна кевлар 49	$E_z = 33190$ $E_\theta = 48690$ $E_r = 13280$	$G_{\theta z} = 9582$ $G_{rz} = 4100$ $G_{r\theta} = 4578$	$\nu_{z\theta} = 0,156$ $\nu_{zr} = 0,343$ $\nu_{\theta r} = 0,343$	$\nu_{\theta z} = 0,228$ $\nu_{rz} = 0,137$ $\nu_{r\theta} = 0,093$	$\alpha_z = 26,7 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_\theta = 16,1 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_r = 23,8 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_z = 1,319$ $\lambda_\theta = 1,943$ $\lambda_r = 0,31$
Боро- пластик	$E_z = 65790$ $E_\theta = 119700$ $E_r = 17880$	$G_{\theta z} = 16770$ $G_{r\theta} = 4240$ $G_{rz} = 3775$	$\nu_{z\theta} = 0,119$ $\nu_{zr} = 0,336$ $\nu_{\theta r} = 0,328$	$\nu_{\theta z} = 0,216$ $\nu_{rz} = 0,091$ $\nu_{r\theta} = 0,049$	$\alpha_z = 23,8 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_\theta = 15,1 \cdot 10^{-6}$ $\alpha_r = 13,3 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_z = 6,937$ $\lambda_\theta = 12,4$ $\lambda_r = 0,257$

Максимальне значення радіальних напружень у кільці з боропластика не перевищує $\sigma_r = 0,4$ МПа. У циліндрі зі склопластику ці напруження практично відсутні і не впливають на його міцність. Слід зазначити, помітне збільшення дотичних напружень поперечного зсуву τ_{rz} на торцях оболонки: $\tau_{rz} = 4$ МПа (боропластик), $\tau_{rz} = 2,2$ МПа (вуглепластик), $\tau_{rz} = 1,8$ МПа (кевлар), $\tau_{rz} = 0,9$ МПа (склопластик).

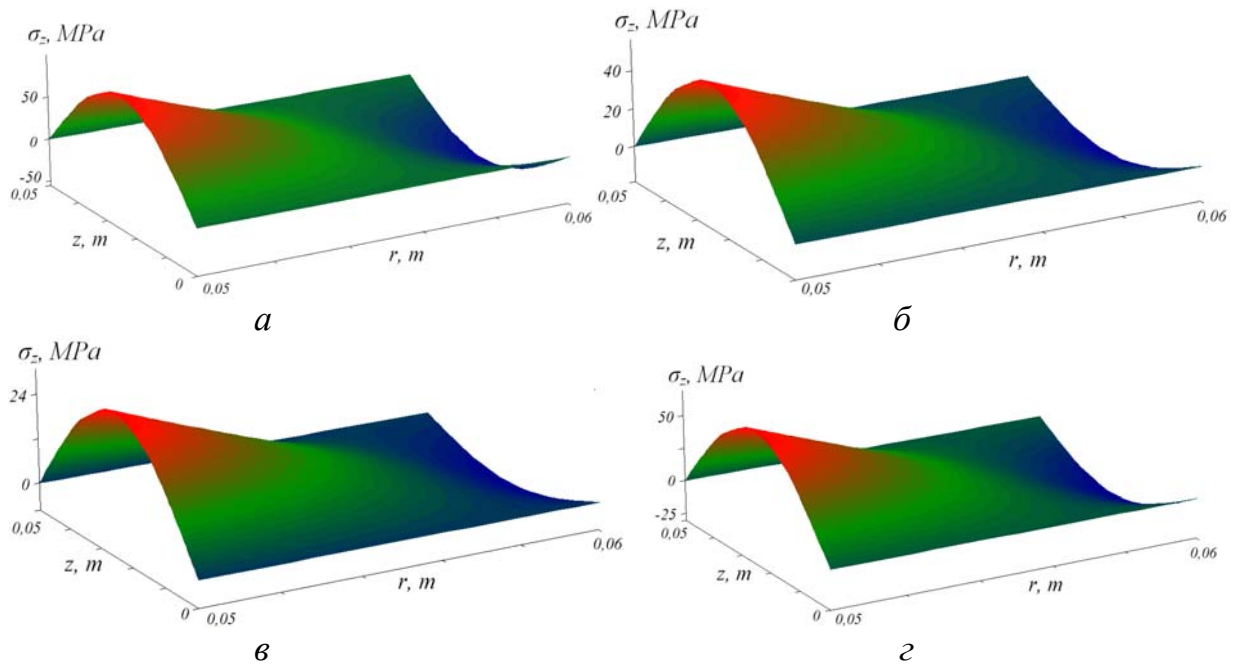


Рисунок 2 – Розподіл осевих напружень σ_z :
а) боропластик; б) кевлар; в) склопластик; г) вуглепластик

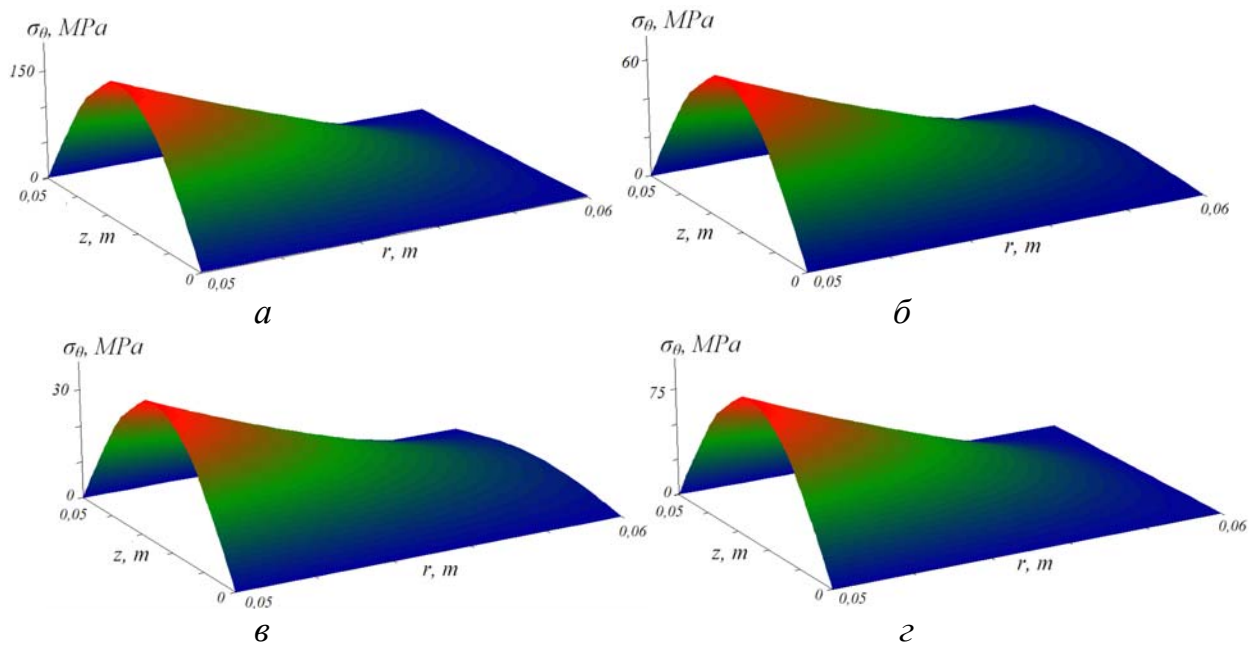


Рисунок 3 – Розподіл колових напружень σ_θ :
а – боропластик; б – кевлар; в – склопластик; г – вуглепластик

Таким чином, в менш жорстких циліндрах зі склопластику тангенціальні напруження, які виникають від дії температурного навантаження, приблизно в 3 рази менше напружень у кільці з вуглепластика.

Для оцінки несучої здатності труб зі склопластику запропонована нова методика розрахунку його конструкційної міцності. Застосовуючи алгоритм покροкового навантаження і модифікований тензорно-поліноміальний критерій міцності

$$\begin{aligned} R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + \\ + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 + \\ + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2R_{1133}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2R_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1, \end{aligned} \quad (1)$$

де компоненти тензорів поверхні міцності визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} R_{11} = \frac{\sigma_{11}^- - \sigma_{11}^+}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}, \quad R_{22} = \frac{\sigma_{22}^- - \sigma_{22}^+}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}, \quad R_{12} = \frac{\sigma_{12}^- - \sigma_{12}^+}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+}, \quad R_{1111} = \frac{1}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}, \\ R_{2222} = \frac{1}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}, \quad 4R_{1212} = \frac{1}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+}, \\ 2R_{1122} = \frac{R_{11} - R_{22}}{\sigma_{12}^-} + R_{1111} + R_{2222} - \frac{1}{(\sigma_{12}^-)^2}, \\ R_{33} = \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, \quad R_{3333} = \frac{1}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, \quad 4R_{1313} = \frac{1}{\sigma_{13}^- \sigma_{13}^+}, \quad 4R_{2323} = \frac{1}{\sigma_{23}^- \sigma_{23}^+}, \\ 2R_{1133} = \frac{R_{11} - R_{33}}{\sigma_{13}^-} + R_{1111} + R_{3333} - \frac{1}{(\sigma_{13}^-)^2}, \\ 2R_{2233} = \frac{R_{22} - R_{33}}{\sigma_{23}^-} + R_{2222} + R_{3333} - \frac{1}{(\sigma_{23}^-)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Враховуючі, що критерій (1) включає напруження поперечного зсуву σ_{i3}^- , σ_{i3}^+ ($i, j = 1, 2$) і трансверсального відриву або стискання σ_{i3}^- , σ_{i3}^+ , нескладно знайти момент руйнування зв'язуючого і порушення статичних і кінематичних умов контакту між шарами.

На рис. 4 показаний загальний вид бандажного з'єднання склопластикових труб ($L = 240$ мм, $L_1 = 140$ мм, $D = 113$ мм). Під час розрахунку на міцність бандажного з'єднання розглядається 2 варіанти бандажного з'єднання. У першому класичному варіанті товщина труб у місці їхнього стику приймається постійною. У другому варіанті приймається з'єднання у вус (рис. 4), коли товщина труби лінійно зменшується із зовнішньої сторони до торців труб, що з'єднують.

Розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану досліджуваних з'єднань проводиться на основі результатів рішення осесиметричної задачі теорії пружності для неоднорідного тіла в пакеті прикладних програм ANSYS. Найнебезпечнішими виявились міжшарові напруження поперечного зсуву і трансверсального відриву. Максимальні значення цих напружень виникають у зоні контакту торців труб, що з'єднуються, і бандажа. Тому для підвищення міцності бандажних з'єднань, у першу чергу, необхідно збільшувати міжшарову міцність склопластику на відрив.

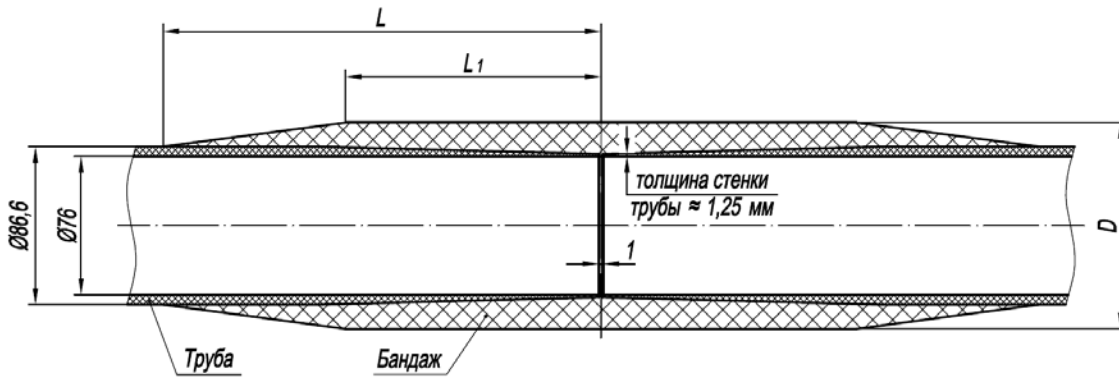


Рисунок 4 – Схема бандажного з'єднання склопластикових труб

Розподіл радіальних напружень σ_r першого та другого варіанту бандажного з'єднання наведені на рис. 5.

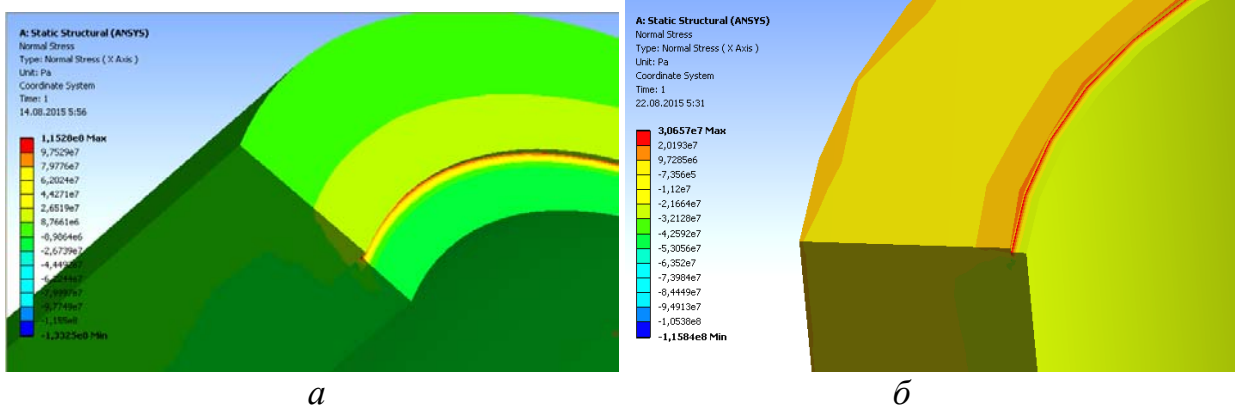


Рисунок 5 – Розподіл трансверсальних (радіальних) напружень σ_r :
 а – перший варіант; б – другий варіант

Аналіз результатів, проведеного чисельного експерименту, дозволяє відзначити наступне. При застосуванні другого варіанта нормальні радіальні напруження в зоні з'єднання труб дорівнюють $\sigma_r = 21$ МПа, для першого класичного варіанта бандажного з'єднання значення цих напружень становлять $\sigma_r = 86$ МПа. Так само зменшується величина нормальних осьових напружень у центрі бандажа з $\sigma_z = 123$ МПа (1 варіант) до $\sigma_z = 68$ МПа (2 варіант). При цьому безпосередньо в склопластиковій трубі ці напруження збільшуються з $\sigma_z = 75$ МПа (1 варіант) до $\sigma_z = 90$ МПа (2 варіант). Така ж картина має місце і для нормальних колових напружень – з $\sigma_\theta = 174$ МПа (1 варіант) до $\sigma_\theta = 105$ МПа (2 варіант) у бандажі та з $\sigma_\theta = 50$ МПа (1 варіант) до $\sigma_\theta = 70$ МПа (2 варіант) у трубі. Слід також зазначити зменшення дотичних напружень із $\tau_{rz} = 20$ МПа (1 варіант) до $\tau_{rz} = 12$ МПа (2 варіант) у небезпечній зоні.

Для розрахунку на міцність приймаються максимальні напруження другого варіанта бандажного з'єднання, які виникають у точках поверхні контакту труба-бандаж (клеювий прошарок) у місці з'єднання труб:

$\sigma_z = 64$ МПа, $\sigma_\theta = 105$ МПа, $\sigma_r = 20$ МПа, $\tau_{rz} = 11$ МПа, $\tau_{r\theta} = 12$ МПа, $\tau_{z\theta} = 1$ МПа.

Для оцінки несучої здатності розглянутої склопластикової оболонки можна використати модифікований критерій міцності (1)–(2), що включає трансвер-

сальні напруження і враховує впливи ослабленого міжфазного контакту шарів. Слід зазначити, що при переході до циліндричної системи координат виконуються тотожності:

$$\sigma_{11} = \sigma_z, \quad \sigma_{22} = \sigma_\theta, \quad \sigma_{33} = \sigma_r, \quad \tau_{31} = \tau_{rz}, \quad \tau_{21} = \tau_{\theta z}, \quad \tau_{32} = \tau_{r\theta}.$$

Для оцінки несучої здатності розглянутих з'єднань експериментально визначалися наступні значення границь міцності бандажа зі склопластику:

$$\sigma_{11}^+ = \sigma_{22}^+ = 200 \text{ МПа}, \quad \sigma_{11}^- = \sigma_{22}^- = -180 \text{ МПа}, \quad \sigma_{33}^- = -90 \text{ МПа}, \quad \sigma_{33}^+ = 60 \text{ МПа}, \\ \sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}, \quad \sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 24 \text{ МПа}..$$

Найнебезпечнішим видом руйнування є деформації поперечного зсуву і трансверсального відриву. Теоретичне значення руйнівного гідростатичного тиску $q_T = 17,35 \text{ МПа}$, що трохи вище експериментально отриманого руйнівного тиску $q_{\text{Э}}^* = 17,0 \text{ МПа}$.

На рис. 6 наведена схема і розміри муфтового з'єднання склопластикових труб ($L = 240 \text{ мм}$, $L_1 = 140 \text{ мм}$, $D = 113 \text{ мм}$). Тут d – внутрішній діаметр труби, δ_T – товщина стінки труби, δ_T^{TP} – товщина стінки торця труби, C – довжина проточки під клейовий шов, d – внутрішній діаметр муфти, δ_M – товщина стінки муфти, δ_M^{TP} – товщина стінки торця муфти, $\delta_M^{\text{TP}} = \delta_M^{\text{B}}$, δ_M^{B} – товщина виточки муфти.

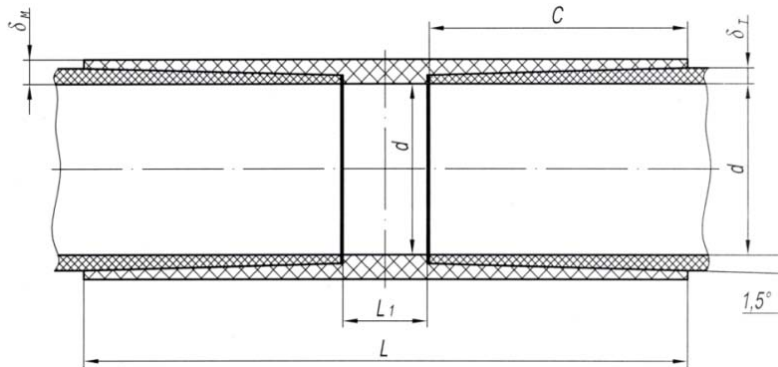


Рисунок 6 – Схема муфтового з'єднання склопластикових труб

Труба з муфтовим з'єднанням навантажена внутрішнім тиском $q = 8 \text{ МПа}$. Для чисельного рішення розглянутої задачі в системі ANSYS була побудована осесиметрична геометрична модель муфти з урахуванням заданої схеми армування і анізотропії шарів. Дискретизація моделі проводилася з використанням чотирикутних восьми вузлових скінчених елементів PLANE183. Розмір скінчених елементів приймався на основі досліджень збіжності отриманого рішення.

Максимальні напруження в муфті розглянутого з'єднання виникають в точках внутрішньої поверхні на відстані C від торців труб, що з'єднують:

$$\sigma_z = 17 \text{ МПа}, \quad \sigma_\theta = 29 \text{ МПа}, \quad \sigma_r = 8,6 \text{ МПа}, \quad \tau_{rz} = 12 \text{ МПа}, \quad \tau_{r\theta} = 1,8 \text{ МПа}, \quad \tau_{z\theta} = 2,1 \text{ МПа}.$$

Беручи до уваги технологію виготовлення муфтового клейового з'єднання, коли на підготовлені торці труб за допомогою епоксидної смоли кріпиться муфта, основним фактором, який визначає міцність такого з'єднання стають властивості клейового шва. Тому граничні значення нормальних напружень склопластикової муфти визначалися експериментально, а граничні напруження поперечного зсуву і відриву клейового шару згідно літературним даним:

$$\sigma_{11}^+ = 240 \text{ МПа}, \sigma_{22}^+ = 410 \text{ МПа}, \sigma_{11}^- = -190 \text{ МПа}, \sigma_{22}^- = -360 \text{ МПа}, \sigma_{33}^- = -90 \text{ МПа}, \\ \sigma_{33}^+ = 60 \text{ МПа}, \sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}, \sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 14 \text{ МПа}.$$

Аналізуючи значення коефіцієнтів критерію міцності (1)–(2), слід зазначити, що найнебезпечнішим видом руйнування є деформації поперечного зсуву і трансверсального відриву. Вже при значенні границі міцності напружень при деформаціях поперечного зсуву $\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 12,5 \text{ МПа}$. відбувається руйнування клейового шару муфта-труба.

На цей час практично відсутні уточнені методики оцінки впливу дефектів на міцність сталевих трубопроводів, що приводить до значного зростання обсягу ремонтних робіт з усунення дефектних ділянок без особливою на те необхідністю. Уточнена методика оцінки впливу виявлених дефектів на міцність системи трубопровод – композитний бандаж дозволить робити більш точний прогноз доцільності ремонту корозійних ділянок трубопроводів.

У цьому зв'язку особливу увагу варто приділити як теоретичному, так і експериментальному вивченню напруженого стану в точках сполученої поверхні сталеві труби та бандажа, а також визначенню найбільш ефективних критеріїв міцності, які з достатньою точністю нададуть оцінку граничного стану ремонтних конструкцій у процесі їхньої експлуатації.

Для досягнення цієї мети за допомогою програмного комплексу ANSYS вивчений напружений стан системи «трубопровод – композитний бандаж», що дозволяє визначити конструктивні параметри композитного бандажа залежно від пошкоджуваності матеріалу труби та геометричних розмірів дефектів. Отримані теоретичні результати та проведені експериментальні дослідження дозволили вибрати критерій міцності і визначити величини граничних напружень у точках сполучення композитного бандажа і сталеві труби.

Об'єкт дослідження являв собою фрагмент сталевий безшовної труби зі сталі марки 09М2С. Основні характеристики труби наведені в розділі 4.

Для гідростатичного тиску 3 МПа за допомогою програмного комплексу ANSYS отримані графіки напруженого стану системи «трубопровод – композитний бандаж».

Аналіз результатів, проведеного чисельного експерименту, показав, що максимальні напруження в композитному бандажі виникають у точках сполученої поверхні контакту склопластик – метал (клейовий прошарок) на границі наскрізного дефекту:

$$\sigma_z = 4,5 \text{ МПа}, \sigma_\theta = 24,5 \text{ МПа}, \sigma_r = 4,2 \text{ МПа}, \tau_{rz} = 1,2 \text{ МПа}, \tau_{r\theta} = 4,1 \text{ МПа}.$$

Для оцінки несучої здатності розглянутої склопластикової оболонки можна використати модифікований критерій міцності (1)–(2), який включає трансверсальні напруження і враховує впливи ослабленого міжфазного контакту шарів.

При цьому вважається, що міжшарова міцність матеріалу на зсув не залежить від знака поперечних дотичних напружень, тобто $\sigma_{13}^+ = \sigma_{13}^-$; $\sigma_{23}^+ = \sigma_{23}^-$.

Необхідною умовою надійної роботи таких бандажних систем є забезпечення надійного зчеплення бандажа з металом труби, тобто виконання ідеальних умов контакту по сполучених поверхнях металу та композита. Для оцінки несучої здатності дефектної ділянки трубопроводу експериментально визначалися наступні значення границь міцності бандажа зі склопластику:

$$\sigma_{11}^+ = \sigma_{22}^+ = 200 \text{ МПа}, \quad \sigma_{11}^- = \sigma_{22}^- = 180 \text{ МПа}, \quad \sigma_{33}^- = 90 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{33}^+ = 15 \text{ МПа}, \quad \sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}, \quad \sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 8 \text{ МПа}.$$

Отримане теоретичне значення граничного гідростатичного тиску $q_T = 3,35 \text{ МПа}$, що трохи нижче експериментально отриманого граничного тиску $q_{\text{Г}}^* = 3,5 \text{ МПа}$.

Встановлено вплив жорсткості фланців на напружено-деформований та граничний стан склопластикових труб в зоні їх з'єднання. Порівнюючи значення дотичних і трансверсальних напружень, які виникають в точках контакту сталевих і дюралюмінієвих фланців зі склопластиковою оболонкою, можна відзначити, що зазначені напруження відрізняються майже в 1,5 рази.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішений ряд важливих науково-технічних завдань, які включають в себе обґрунтування моделей і методик розрахунку напружено-деформованого та термопружного стану багатошарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури. Розроблені алгоритми, програми, методики досліджень та отримані на їх основі теоретико-експериментальні результати показали наявність нових особливостей деформованого стану розглянутих конструкцій.

1. Створено методику дослідження термопружного стану багатошарових оболонок обертання, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування).

2. Побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування багатошарової композитної оболонки, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення, забезпечити умови механічного і теплового сполучення шарів і умови термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки.

3. Розроблено та апробовано методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури. Запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів теплового лінійного розширення та теплопровідності багатошарового анізотропного матеріалу. Це 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, який реалізовано на мові програмування VISUAL FORTRAN. Встановлено вплив температурних навантажень та схем армування окремих шарів на напружено-деформований стан багатошарової циліндричної оболонки, виготовленої із композиційних матеріалів.

4. Розв'язано задачу конструкційної міцності і створено методику визначення граничного внутрішнього тиску багатошарових циліндричних оболонок, 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 трансверсального відриву. Щоб забезпечити можливість перерозподілу навантажень між трубами, що з'єднують, і муфтою при внутрішньому тиску, потрібно 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 тензометрування 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 тензометрування 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.

5. 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.

6. Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження результатів дисертації при розрахунку конструкцій з композиційних матеріалів для хімічного машинобудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Данильцев В.В. Производство и эффективность применения стеклопластиковых труб / В.В. Данильцев, В.Г. Данильцев // Вісник Інженерної Академії України. – 2003. – № 2. – С. 73–77.

2. Данильцев В.В. Производство стекло- и базальтопластиковых труб для промышленных нефтепроводов / В.В. Данильцев, В.Г. Данильцев, В.И. Дворниченко, В.И. Круглик // Инженерные сети из полимерных материалов. – 2005. – № 4. – С. 28–29.

3. Данильцев В.В. Современное производство стеклопластиковых труб / В.В. Данильцев, А.В. Леонов // Водопостачання та водовідведення – 2011. – № 2. – С. 20–25.

4. Данильцев В.В. Розрахунок на міцність склопластикових труб у зоні фланцевих з'єднань / С.М. Верещака, В.В. Данильцев, Д.А. Жигилий // Машинознавство. – 2013. – № 1 – 2. – С. 9–13.

5. Данільцев В.В. Прочность локальных дефектных участков стальных трубопроводов с ремонтным бандажом из стеклопластика / С.М. Верещака, Д.О. Жигилій, В.В. Данільцев, А.В. Дейнека // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–14.

6. Данільцев В.В. Термоупругое напряженное состояние стеклопластиковой трубы в зоне соединения с металлическим фланцем / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, В.В. Данільцев // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”. – 2015. – №11 (27). – С. 124–128.

7. Данільцев В.В. Прочность бандажного и муфтового соединений стеклопластиковых труб / С.М. Верещака, В.В. Данільцев // Збірник наукових праць: «Вісник національного технічного університету “ХПІ”. Серія “Динаміка і міцність машин”. – 2015. – № 55. – С. 35–42.

8. Данильцев В.В. Конструкционная прочность вытяжной трубы из композиционного материала при действии ветровой нагрузки / С.М. Верещака, В.В. Данильцев, Д.А. Жигилій // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”. – 2015. – № 11 (27). С. 129–133.

9. Данильцев В.В. Физико-механические характеристики уплотнительного кольца рабочего колеса центробежного насоса из композиционного материала / С.М. Верещака, В.В. Данильцев, А.В. Дейнека // Проблемы прочности. – 2016. – № 3. – С. 43–46. (*індексується базою даних SCOPUS*).

10. Danil'tsev V.V. Stress State of Sealing Ring of Composite Material with the Specified Physical and Mechanical Characteristics /V. V. Danil'tsev, S. M. Vereshchaka, A. V. Deineka //Strength of Materials. New York, USA: Springer.– May 2016, Vol. 48, № 3. – P. 371–374. (*індексується базою даних SCOPUS*).

11. Данільцев В.В. Конструкційний шар труби із композиційного матеріалу / В.В. Данільцев, В.Г. Данільцев, М.В. Злочевський, М.П. Лісін, О.В. Таранов // Патент на винахід, 2000, № 37756.

12. Данильцев В.В. Оправка для непрерывного намотування труб з композиційних матеріалів / В.В. Данильцев, В.Г. Данильцев // Патент на корисну модель, 2011, № 58462.

13. Данільцев В.В. Верстат для виробництва труб з армованих пластмас / В.В. Данильцев, Ю.А. Шагалін, В.С. Сушчінський // Патент на корисну модель, 2013, № 84029.

14. Данильцев В.В. Термоупругое напряженное состояние, возникающее при соединении металлического фланца со стеклопластиковой трубой / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, В.В. Данильцев, И.В. Верещака / Технологія ХХІ століття : матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 15–19 вересня 2014 р. – Южне, 2014. – С. 53.

15. Данільцев В.В. Конструкційна міцність витяжної труби з композиційного матеріалу від дії вітрового навантаження / С.М. Верещака, Д.О. Жигилій, В.В. Данільцев / 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей. – Львів : КІНПАТРІ ЛТД. – 2015. – С. 11.

16. Данільцев В.В. Розв'язання задачі термопружності склопластикової труби за допомогою сплайн-функцій / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, В.В. Да-

нільцев / 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові : Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – С. 51.

17. Данильцев В.В. Прочность локальных дефектных участков стальных трубопроводов с ремонтным бандажом из стеклопластика / В.В. Данильцев / Композиты СНГ : сб. докладов 5-й ежегодной международной конференции, 1–2 октября 2015 г. – г. Минск, Беларусь. – С. 28–38.

АНОТАЦІЯ

Данильцев В.В. Міцність конструкцій зі склопластику з міжшаровими дефектами структури матеріалу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Сумський державний університет, Суми, 2016.

У дисертаційній роботі вирішений ряд важливих науково-технічних завдань, які включають в себе обґрунтування моделей і методик розрахунку напружено-деформованого та термопружного стану багатошарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури.

Розроблено та апробовано методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури, запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів теплового лінійного розширення та теплопровідності багатошарового анізотропного матеріалу. Визначений термопружний деформований стан багатошарових оболонок обертання.

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

За допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності отримані значення величин граничного тиску, при якому відбувається руйнування склопластикової труби в точках контакту її поверхні з металевими фланцями.

Ключові слова: багатошарові оболонки, конструкційна міцність, дискретно-структурна теорія, міжшарові дефекти структури матеріалу, термопружне деформування, фланцеві, бандажні та муфтові з'єднання.

АННОТАЦИЯ

Данильцев В.В. Прочность конструкций из стеклопластика с межслойными дефектами структуры материала. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Сумской государственной университет, Сумы, 2016.

В диссертационной работе решен ряд важных научно-технических заданий, которые включают в себя обоснования моделей и методик расчета напряженно-деформированного и термоупругого состояния многослойных оболочек вращения с межслойными дефектами структуры.

Разработана и апробирована методика определения интегральных термоупругих характеристик композитов слоистой структуры, предложен алгоритм

определения коэффициентов теплового линейного расширения и теплопроводности многослойного анизотропного материала. Определено термоупругое деформированное состояние многослойных оболочек вращения.

Решена задача конструкционной прочности и создана методика определения предельного внутреннего давления многослойных цилиндрических оболочек, изучено напряженное состояние стеклопластиковых труб в зоне фланцевых, бандажных и муфтовых соединений.

При помощи модифицированного полиномиального критерия прочности получены значения предельного давления, при котором произойдет разрушение стеклопластиковой трубы в точках контакта ее поверхности с металлическими фланцами.

Ключевые слова: многослойные оболочки, конструкционная прочность, дискретно-структурная теория, межслойные дефекты структуры материала, термоупругое деформирование, фланцевые, бандажные и муфтовые соединения.

ABSTRACT

Daniltsev V. V. The Strength of fiberglass constructions with interlaminar structure defects of the material. – The manuscript.

The dissertation on the scientific degree competition of candidate of technical Sciences in specialty 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - Sumy state University, Sumy, 2016.

A number of important scientific and technical tasks has been solved in this dissertation, including the justification of the models and methods of calculation of the stressed and strained state as well as the thermoelastic state of layered rotation shells with interlaminar structure defects.

The method of the integral thermoelastic characteristics of layered structure composite determination has been developed and tested; the algorithm of the thermal linear extension and thermal conductivity of layered anisotropic material coefficient definition was suggested. The thermoelastic strained state of multilayer rotation shells has been determined.

The problem of the structural strength has been solved and the technique of determining the maximum internal pressure of multi-layered cylindrical shells has been invented; the stress state of the GRP pipes in flange, bandage and socket joint areas has been studied.

Using the modified polynomial strength criterion, the critical pressure values, at which the rupture occurs at the points of GRP pipes surface contact with metal flanges, have been calculated.

Keywords: multilayered shells, structural strength, discrete-structural theory, interlaminar defects in the structure of the material, thermoelastic deformation, flange, bandage and socket joints.

Підп до друку 01.09.2016 р. Формат 60 × 90 / 16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 пр.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець
ТОВ «Видавництво «Підручник НТУ «ХП»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3656 від 24.12.2009 р.

Виготовлювач
ТОВ «Л'єколь»,
вул. Командарма Уборевіча, 20, кв. 171, м. Харків-144, 61144