

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЖИГИЛІЙ Дмитро Олексійович

УДК 539.3

КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ КОМБІНОВАНИХ БАЛОНІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

05.02.09 - Динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті

Міністерства освіти і науки України.

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

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

кандидат технічних наук **ГАДЯКА Володимир Григорович**,
ВАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе», начальник відділу газодинаміки,
динаміки та міцності машин.

Захист відбудеться «17» грудня 2010 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради К55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою:
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова 2.

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

Автореферат розісланий «12» листопада 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К55.051.03

Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Внаслідок обмеженості більшої частини доступних джерел нафти світові виробники транспортних засобів завжди виявляли і виявляють цікавість до досліджень з використання нетрадиційних моторних палив – природний газ, біопаливо, водень і т.ін.

Найбільшими споживачами газових балонів є компанії, що оперують на ринку природного газу, виробники і продавці промислових газів. Нині у світі використовують понад 8 млн балонів для зберігання природного газу: з них близько 7 млн – металеві балони, 1 млн – композитні. Європейські компанії наповнюють, зберігають і транспортують приблизно 40 млн балонів, обслуговуючи потреби ринку технічних газів. За оцінками «Worthington Cylinders GmbH», до 2011 р. місткість першого сегмента зросте на 4,44 млн шт., а іншого – на 5,575 млн шт. Найбільший попит на балони очікуватиметься, передусім, в автомобілебудуванні, на ринках дихальних апаратів, харчової промисловості, електроніки, устаткування для пожежогашіння і т.д.

Україна також зацікавлена в переобладнанні автомобілів для роботи на природному газі. Цьому сприяють розвинена газотранспортна система, наявність ресурсів природного газу і шахтного метану, мережа діючих автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій. За кількістю працюючих на стиснутому природному газі автомобілів Україна посідає дев'яте місце у світі і є лідером серед країн СНД у використанні альтернативних видів палива. Наприклад, обсяги продажів стиснутого газу як транспортного палива у нас втричі більші, ніж у Росії.

При постачанні газу в сталевих балонах, широко використовуваних на цей час, об'єм газу, що поставляється, є обмеженим вантажопідйомністю транспортного засобу. Застосування легких композитних балонів дозволить збільшити об'єм газу, що перевозиться, а зменшення вартості балона приведе до зменшення вартості транспортування газу. Тому актуальним є питання створення нових ефективних конструкцій газових балонів і надійних методик їх розрахунку. Застосування легких металокомпозитних балонів дозволить збільшити об'єм газу, що перевозиться, і, як наслідок, зменшити вартість транспортування газу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що проводяться в дисертації, тісно пов'язані з науковими програмами Сумського державного університету, які виконувалися у рамках держбюджетної тематики «Розробка методів оцінки надійності роботи конструкцій хімічного машинобудування з сучасних композиційних матеріалів» (держреєстрація № 0103U000768).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – дослідження конструкційної міцності і несучої здатності комбінованих газових балонів високого тиску. На основі проведених досліджень розробити методику розрахунку на міцність, жорсткість і несучу здатність внутрішньої оболонки балона, виконаної з композиційних матеріалів, і зовнішньої металевої оболонки за умови їх

спільної роботи.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішені такі завдання:

– розроблено методика розв’язання геометрично нелінійних контактних задач на основі дискретно-структурної теорії багат шарових пластин і оболонок, коли на одній частині міжфазної границі виконуються умови ідеального контакту, а на іншій мають місце ділянки з неідеальним контактом (непроклей, розшарування, проковзування);

– експериментально перевірено достовірність числових результатів, отриманих на основі трьох варіантів розрахункових моделей багат шарових оболонок і пластин;

– розроблено методика оцінки конструкційної міцності й несучої здатності нової конструкції комбінованого балона високого тиску.

Об'єкт дослідження – конструкційна міцність і несуча здатність тонкостінних елементів конструкцій шаруватої структури.

Предмет дослідження – комбінований газовий балон, внутрішня несуча оболонка якого виконана з композиційного матеріалу шаруватої структури, а із зовнішнього боку захищена металеву оболонкою.

Методи дослідження. Для розв’язання геометрично нелінійної контактної задачі застосовуються такі методи: штрафних функцій, Фур’є, скінченних різниць, переміщень, ортогональної прогонки. На основі методу переміщень складені алгоритм і програма розрахунку на міцність багат шарових оболонок обертання складної форми. Для оцінки достовірності отриманих теоретичних і експериментальних даних застосовувалися методи математичного моделювання, був поставлений і проведений фізичний експеримент.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

– уперше на основі методу штрафних функцій отримано числовий розв’язок задачі міцності і несучої здатності тонкостінних елементів шаруватої структури з неідеальним міжшаровим контактом; виявлені основні закономірності зміни напруженого стану і контактного тиску в зоні локальних ділянок непоклею і розшарувань;

– запропоновано експериментальну методика і проведено перевірку теоретичних результатів, отриманих на основі запропонованих варіантів розрахункових моделей багат шарових конструкцій;

– на основі методу переміщень розроблено методика розрахунку конструкційної міцності і несучої здатності оболонок обертання шаруватої структури матеріалу;

– досліджено вплив різних типів структури матеріалу на величину несучої здатності комбінованих газових балонів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень використовувалися при розробленні нових конструкцій і виробів з композиційних матеріалів для хімічного

машинобудування. Проведено оцінку конструкційної міцності нової конструкції комбінованого балона високого тиску. Подано аналіз несучої здатності і техніко-економічних показників комбінованого балона.

Теоретичні і числові результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні тонкостінних конструкцій з композиційних матеріалів для зберігання і транспортування стиснутого природного газу на підприємстві ВАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе», а також використовуються при проведенні навчального процесу кафедри опору матеріалів та машинознавства Сумського державного університету.

Достовірність отриманих результатів забезпечується 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.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням, яке виконане під керівництвом доцента С.М. Верещак на кафедрі опору матеріалів і машинознавства Сумського державного університету. У публікаціях, виданих у співавторстві, здобувачеві належать такі наукові результати:

[1, 8] – розроблена методика математичного моделювання нової конструкції комбінованого балона, виявлені особливості зміни напруженого стану і контактного тиску по спряжених поверхнях склопластикової несучої оболонки та металевої оболонки;

[2, 9] – модернізована експериментальна установка для визначення напружено-деформованого стану пластин із композиційних матеріалів; проведені експериментальні і теоретичні дослідження напружено-деформованого стану круглих у плані трансверсально-ізотропних пластин;

[3, 4] – розроблена і виготовлена експериментальна установка для визначення напружено-деформованого стану циліндричних оболонок із композиційних матеріалів при дії внутрішнього тиску, а також проведений аналіз експериментальних і теоретичних результатів задач міцності та несучої здатності тонкостінних елементів шаруватої структури з неідеальним міжшаровим контактом;

[5, 7] – розроблена методика оцінки конструкційної міцності і несучої здатності нової конструкції комбінованого балона високого тиску.

Апробація результатів дисертації. Зміст основних розділів і окремі результати роботи доповідалися на: XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Компресорна техніка і пневматика в XXI столітті» (Суми, 2004), XI Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного устаткування» (Суми, 2005), Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки –

2006» (Дніпропетровськ, Дніпродзержинськ, 2006), Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (Харків, 2006), X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія» (Київ – Севастополь, 2009), Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем і елементів їх конструкцій» (Севастополь, 2010), науково-технічних конференціях викладачів, співробітників і студентів Сумського державного університету (Суми, 2005 – 2010).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових робіт, із них 7 статей у спеціалізованих журналах, які включені до переліку, затвердженого ВАК України, 2 публікації у матеріалах праць конференцій і тез доповідей на наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатка і списку використаних джерел. Дисертація обсягом 143 сторінки машинописного тексту містить 44 рисунки і 15 таблиць. Список використаної літератури містить 219 джерел і розміщений на 23 сторінках. Додатки розміщені на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

Перший розділ містить огляд і аналіз сучасного стану проблеми розрахунку комбінованих балонів високого тиску, коли враховується вплив міжшарових дефектів структури композиційних матеріалів на їх конструкційну міцність і несучу здатність. Основна увага приділяється постановкам і методам розв'язання задач при неідеальному контакті, коли порушуються умови неперервності переміщень і напружень поверхнями спряження окремих шарів даних конструкцій.

Класифікацію циліндричних балонів високого тиску для зберігання природного газу дає Міжнародний стандарт ISO 11439–2003. Показано, що основна перевага балонів, виготовлених із застосуванням композиційних матеріалів, – менша маса. Питома вага таких балонів порівняно з питомою вагою суцільнометалевих балонів знижується в 2–3 рази. Проте через високу вартість склопластика і трудомісткої технології виготовлення вартість таких балонів вища.

Відзначено, що для проектування і розрахунку балонів тиску з композиційних матеріалів на практиці застосовуються, як правило, два підходи. Згідно з першим волокна композиційного матеріалу розподілені деяким заданим чином, а полімерна матриця подається однорідним матеріалом з ізотропними властивостями. Далі визначаються середні пружні сталі шарів матеріалу залежно від пружних сталей волокон і з'єднувача, їх об'ємного вмісту в матеріалі та схем армування. Другий підхід моделює оболонку з композиційного матеріалу пружними нитками, які при натяганні сприймають все зовнішнє навантаження. З'єднувач приймається пружно

податливим і служить для створення монолітності структури матеріалу, а його несуча здатність не враховується. Цей метод розрахунку оболонок називається «сітчастим аналізом». Вважається, що перший підхід дає точніші результати.

Розрахункові моделі тонкостінних конструкцій багатошарової структури з анізотропних матеріалів за першим підходом визначаються основними положеннями теорії анізотропних пластин і оболонок. Вагомий внесок у розвиток класичної і уточнених некласичних теорій анізотропних пластин і оболонок, обґрунтування запропонованих некласичних моделей і встановлення зв'язку між ними і просторовими завданнями теорії пружності містяться в працях вітчизняних і зарубіжних учених : Н.П. Абовського, Х. Альтенбаха, С.О. Амбарцумяна, І.Ю. Бабича, Л.Е. Брюкера, А.Т. Василенка, В.В. Васильєва, І.Н. Векуа, В.Е. Вериженка, К.З. Галімова, А.К. Галіньша, О.Л. Гольденвейзера, Е.І. Григолюка, Я.М. Григоренка, О.Н. Гузя, М.О. Кільчевського, С.Г. Лехницького, А.І. Лур'є, 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, В.К. Присяжнюка, 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, В.К. Чібірякова, Л.Г. Доннела (L.H. Donnel), П. Нагді (P.M. Naghdi), Е. Рейснера (E. Reissner), С.І. Хатчінса, (C.I. Hutchins), А.К. Нура (A.K. Noor), Н.Дж. Пейгано (N.J. Paganò), Дж.Н. Редді (J.N. Reddy) та інших.

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, А.Т. Василенко, Е.І. Григолюк, Я.М. Григоренко, В.І. Гуляєв, В.І. Зубко, А.В. Іванов, Б.Я. Кантор, В.Н. Кобелєв, 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, В.М. Роменський, Ю.Н. Тамуров, П.П. Чулков, М.М. Хом'як, І.А. Цурпал, Л. Лібреску (L. Librescu), Т. Хаузе (T. Hause), А. К. Нур (A. K. Noor), Е. Рейснер (E. Reissner) та ін.

У працях О.М. Гузя, В.В. Болотіна, Г.А. Ваніна, В.В. Васильєва, Г.П. Зайцева, В.В. Захарова, В.Н. Кобелева, М.К. Кучера, О.К. Малмейстера, І.Ф. Образцова, Б.Л. Пелеха, Б.С. Победрі, С.В. Серенсена, В.П. Тамужа, Ю.М. Тарнопольського, Г.О. Тетерса, М. О. Шульги, Р.М. Крістенсена (R.M. Cristensen), Дж. Кларка (G. Clark) та інших авторів розроблені методи визначення ефективних характеристик шаруватих композитних систем, а також дано теоретичне і експериментальне обґрунтування застосування різних критеріїв міцності при розрахунках анізотропних елементів шаруватої структури з міжшаровими дефектами на несучу здатність.

До цього часу виконано значну кількість робіт, присвячених створенню методів розрахунку на міцність оболонок із композиційних матеріалів шаруватої структури, але жодна з існуючих

розробок не містить досить ефективного методу розрахунку багатошарових комбінованих балонів високого тиску з урахуванням шаруватої структури пакета, анізотропії пружних властивостей матеріалу, схеми армування, характерних конструктивних чинників, особливостей спільної роботи і умов контакту шарів.

Необхідно зазначити, що значна частина розрахунків на міцність анізотропних оболонок і пластин відповідно до припущень макropідходу проводиться в геометрично і фізично лінійній постановці. Проте, як показали розрахунки на міцність посудин високого тиску зі склопластиків, вже при навантаженнях, що дорівнюють 15 – 20% від руйнівних, значення напружень в окремих шарах оболонки вищі за межі міцності однонапрявленого матеріалу.

Актуальними, як і раніше, залишаються питання експериментальної перевірки різних моделей, що враховують дефекти структури композиційного матеріалу, розроблення пакетів прикладних програм розрахунку тонкостінних конструкцій на міцність із розшаруваннями.

У другому розділі розроблена методика розв'язання крайових задач дискретно-структурної теорії шаруватих пластин і оболонок із дефектами структури на міжшарових межах.

Для обчислення геометричних параметрів оболонок обертання складної форми запропонований алгоритм апроксимації меридіана такої поверхні у вигляді В-сплайнів, як параметричних функцій $(z(t), y(t))$ на рівномірній сітці. Подано аналіз методів визначення пружних характеристик окремих шарів армованих високомодульними волокнами на макрорівні і методів зведення за Фойгтом і Рейсом, показано схему лінеаризації розв'язувальних нелінійних диференціальних рівнянь на основі ітераційного методу Ньютона-Канторовича.

У разі, коли композит є набором n різно орієнтованих шарів однонапрявленого матеріалу, запропонована методика визначення зведених пружних характеристик і компонент матриць жорсткості даного пакета шарів у цілому. Порівняння отриманих результатів і аналогічних даних, наведених в уже відомих публікаціях, підтверджує коректність запропонованої методики визначення усереднених технічних параметрів багатошарового композиту.

На основі варіаційного принципу Рейснера були отримані вирази нелінійних функцій розподілу деформацій поперечного зсуву за товщиною багатошарового пакета, які дозволяють точно виконати статичні умови контакту на лицьових поверхнях першого і n -го шару анізотропної оболонки. Ці вирази включають ненульові значення горизонтальних і вертикальних складових зовнішнього навантаження $q_{(1)}^{(-)}$, $q_{(n)}^{(+)}$, $q_{(1)}^{(-)}$, $q_n^{(+)}$.

На основі залежностей геометрично нелінійної дискретно-структурної теорії шаруватих елементів конструкцій досліджено напружено-деформований стан анізотропних пластин та оболонок. Для оболонок обертання, які включають n шарів із співвісними поверхнями, застосовується розв'язувальна система з $n \times 14$ диференціальних рівнянь у частинних похідних.

$$\frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{A_{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} = F \left(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \bar{Y}^{(k)}, \frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{B_{(k)} \partial \alpha_2^{(k)}} \right), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де $\bar{Y}^{(k)} = \{Y_1^{(k)}, Y_2^{(k)}, \dots, Y_{14}^{(k)}\}^T =$

$= \{T_{11}^{(k)}, T_{12}^{(k)}, R_{13}^{(k)}, M_{11}^{(k)}, M_{12}^{(k)}, L_{11}^{(k)}, L_{12}^{(k)}, u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, w^{(k)}, \gamma_1^{(k)}, \gamma_2^{(k)}, \psi_1^{(k)}, \psi_2^{(k)}\}^T$ – вектор розв’язків.

Згідно з уточненою теорією С.П. Тимошенка вираз повного вектора переміщень точок анізотропного жорсткого шару включає вектор-функції кутів повороту і обтиснення волокон, перпендикулярних до недеформованої серединної поверхні шару, а також вектор-функції зсуву. Введення вектор-функції зсуву дозволяє врахувати нелінійний характер розподілу тангенціальних переміщень по товщині шару.

Статичні умови контакту по лицьових спряжених поверхнях сусідніх шарів виконуються за допомогою методу штрафних функцій. На основі запропонованого варіанта дискретно-структурної теорії розроблено дві розрахункові моделі, які включають ділянки неідеального контакту спряжених поверхонь анізотропних шарів.

Через те, що між жорсткими шарами в процесі виготовлення анізотропних оболонок утворюється міжфазний м’який клейовий шар, товщину цього шару, як правило, вважають нульовою. Тоді відповідно до припущень першого варіанта моделі можливе пружне проковзування жорстких шарів один відносно одного, тобто по лицьових спряжених поверхнях виконуються тільки статичні умови контакту і напруження поперечного зсуву, і обтиснення двох сусідніх шарів на межі контакту рівні між собою.

Суть другого варіанта розрахункової моделі багат шарової анізотропної оболонки полягає в тому, що дана оболонка складається з n жорстких анізотропних шарів завтовшки $h^{(k)}$, ($k = 1, 2, \dots, n$), і між зв’язаними жорсткими шарами знаходиться клейовий прошарок ненульової товщини $h^{[k]}$, ($k = 1, 2, \dots, n-1$). Переміщення точок клейового прошарку лінійно змінюються за товщиною та залежать від переміщень і кутів повороту жорстких шарів.

Для оцінки теоретичних результатів, отриманих за першою і другою моделями, кусково-неоднорідні за товщиною шаруваті оболонки розглядаються як квазіоднорідні зі зведеними пружними характеристиками (третя модель). При цьому виконується припущення про ідеальний жорсткий контакт суміжних шарів.

Розв’язок крайової задачі отриманий за допомогою методу ортогонального прогону, запропонованого С.К. Годуновим. Він розроблений як метод розв’язання двоточкових крайових задач для систем лінійних звичайних диференціальних рівнянь. На основі цього методу проблема сингулярності матриці системи алгебраїчних рівнянь, що виникає при пошуку довільних сталих, вирішується шляхом ортогоналізації компонент розв’язку на дискретному наборі точок інтервалу розв’язку. Перевірка достовірності отриманих результатів проводилася на тестових прикладах за

допомогою відомого пакета прикладних програм ANSYS, складеного на основі методу скінченних елементів. Крім того, розв'язок даних крайових задач був отриманий за допомогою підпрограм математичної бібліотеки IMSL, що входить до складу професійних версій ФОРТРАН, методом скінченних різниць зі змінним кроком і повільною корекцією, яка використовує різні порядки точності.

Аналіз теоретичних і експериментальних результатів показує, що найбільш адекватно реальну роботу двошарових пластин і оболонок відображає перший варіант розрахункової моделі дискретно-структурної теорії.

Перша і друга модель являють собою двошарову пластину діаметром 0,17 м з двох жорстких трансверсальних ізотропних шарів завтовшки $h_{(1)} = h_{(2)} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м. Друга модель має тонкий клейовий прошарок завтовшки $h_{[0]} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Третя модель – трансверсальна ізотропна пластина завтовшки $h = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Відносна похибка теоретичного значення прогину в центрі пластини порівняно з експериментальними даними становила менше 3%. При цьому урахування геометричної нелінійності деформацій істотно уточнює величину радіальних напружень порівняно з експериментальними даними, особливо в стиснутій зоні в центрі пластини.

На основі запропонованої методики проведена оцінка впливу дефектів структури матеріалу у вигляді ділянок непоклею на напружено-деформований стан багатошарових пластин і оболонок. Відзначено, що на межі ділянки непоклею має місце крайовий ефект, протяжність зони якого не перевищує двох товщин пластинки. Величина зміни нормального напруження в жорстких шарах оболонки на межі ділянки непоклею значною мірою визначається довжиною ділянки непоклею. Крім того, на межі непоклею в клейовому шарі виникає значне напруження трансверсального обтиснення.

Дана оцінка впливу на напружений стан тонкостінних елементів конструкцій початкових дефектів у вигляді ділянок непоклею або розшарувань з урахуванням можливого одностороннього контакту суміжних шарів на цих ділянках. Можливий контактний тиск між шарами визначався коефіцієнтом зниження жорсткості обтиснення і різницею нормальних переміщень суміжних шарів. Величина зони контакту уточнювалася за допомогою методу простих ітерацій.

У третьому розділі розроблена методика експериментальної перевірки достовірності теоретичних результатів і оцінки похибок, що вносять різного роду припущення в розрахунки на міцність тонкостінних елементів з міжшаровими дефектами.

Наведені фізико-механічні характеристики основних компонент склопластика – скловолокна, конструкційної склотканини і в'язучих матеріалів (епоксидна смола або поліестерна ортофталева смола), дана коротка характеристика технології виготовлення зразків.

На основі методів математичної статистики визначені довірчі інтервали експериментально набутих середніх значень модуля пружності і межі міцності склопластика при розтяганні і стисканні, а також границі міцності склопластика при згинанні.

Створено дві експериментальні установки (рис.1 – 2), які були розроблені і виготовлені для проведення випробувань пластин і тонкостінних циліндрів зі склопластика на дію рівномірно розподіленого тиску. Граничні умови закріплення контурів пластин і торців циліндрів можуть варіюватися від умов вільного опирання до жорсткого затиснення.

Конструкції експериментальних установок дозволяють вимірювати прогини пластин і нормальних переміщень циліндрів за допомогою індикаторів годинникового типу з точністю вимірів до $0,5 \cdot 10^{-5}$ м.

Вимірювання відносних деформацій проводилося методом тензометрування в точках як ненавантаженої, так і навантаженої поверхні зразка.

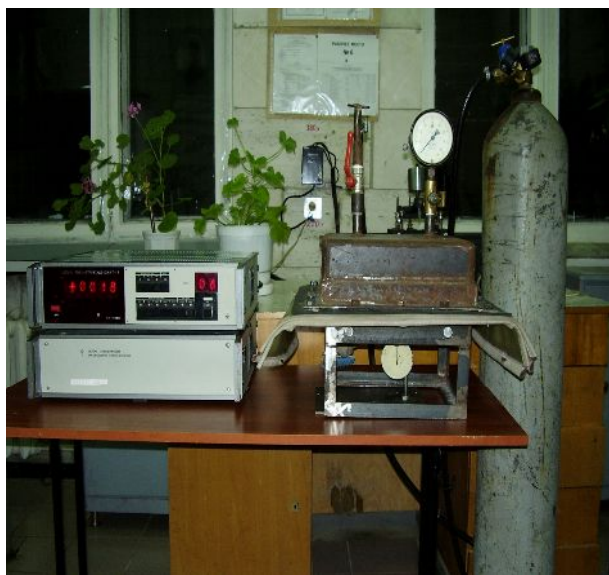


Рис. 1. Експериментальний стенд для проведення випробувань пластин

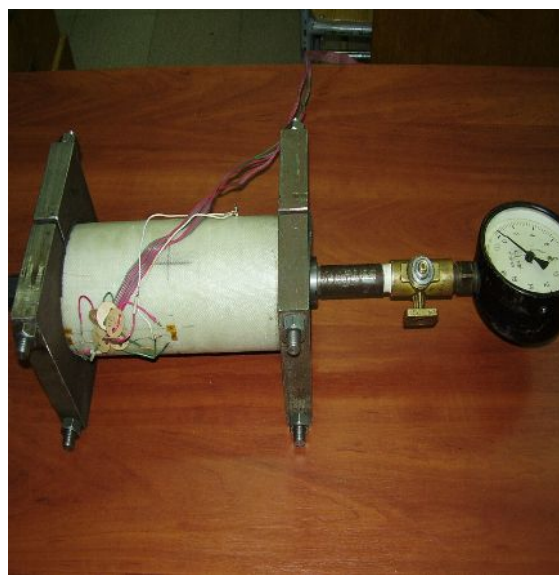


Рис. 2. Експериментальний стенд для проведення випробувань циліндрів

Порівняння експериментальних даних з теоретичними результатами дозволило зробити висновки, що в результаті низької жорсткості склопластиків на згин і слабого опору поперечному зсуву застосування традиційної неперервно-структурної моделі при розрахунках тонкостінних армованих елементів конструкцій навіть на початковій стадії навантаження призводить до значних похибок. Крім того, при поперечному згині тонких пластин, коли прогин порівняний із

товщиною пластини, необхідно використовувати в розрахунках геометрично нелінійні деформаційні співвідношення.

Установлено, що у разі безмоментного напруженого стану багатошарової трансверсальної ізотропної циліндричної оболонки при дії внутрішнього тиску дискретно-структурна і неперервно-структурна теорії дають практично однаковий результат.

Досліджувався напружений стан циліндричних оболонок зі склопластика завдовжки 0,1 – 0,2 м, діаметром 0,09 м і товщиною 0,002 м. Циліндри були виконані з чотирьох шарів склотканини TG 430 - C (100). Як з'єднувач використовувалася поліестерна ортофталева смола зі зниженою емісією стиролу Cristic 2 - 446 PA . Частина зразків мала початкові дефекти у вигляді ділянок непроклею кільцевої форми в центрі циліндра, які знаходилися між другим і третім шарами. Ділянки непроклею були створені у момент виготовлення зразків за допомогою тонкої поліетиленової плівки.

Теоретичні і експериментальні результати отримані для жорстко закріплених на торцях циліндричних оболонок. При дії внутрішнього гідростатичного тиску інтенсивністю q визначалися величини нормальних напружень σ_z , σ_θ , в поздовжньому і коловому напрямках відповідно, а також напруження поперечного зсуву – σ_{rz} .

На рис. 3 – 5 наведені графіки зміни напружень і радіальних переміщень w вздовж твірних циліндрів 1-ї серії (довжина $L = 0,1$ м). Досліджувалися жорстко затиснуті на торцях циліндри при дії внутрішнього тиску $q = 2,5$ МПа .

При експериментальному визначенні напруженого стану склопластиків має місце розкид результатів. В основному причини, що викликають розкид даних експерименту, не пов'язані з методикою випробування, а викликані недосконалою технологією виготовлення зразків. Проте запропонована тут методика експерименту, висока якість виготовлення зразків дозволили отримати досить точні результати (відносна похибка результатів теорії і експерименту не перевищує 5%).

Окремо слід зазначити, що у разі безмоментного напруженого стану (при внутрішньому тиску $q = 2,5$ МПа (рис. 5, б) величина прогину w не перевищує $0,18 \cdot 10^{-3}$ м) перша і третя розрахункові моделі багатошарової трансверсальної ізотропної оболонки дають практично однаковий результат, який досить точно збігається з величиною колового напружень, отриманою за формулою $\sigma_\theta = \frac{qr}{h}$. Основна відмінність результатів за цими двома моделями спостерігається в області жорстко затиснених торців оболонки.

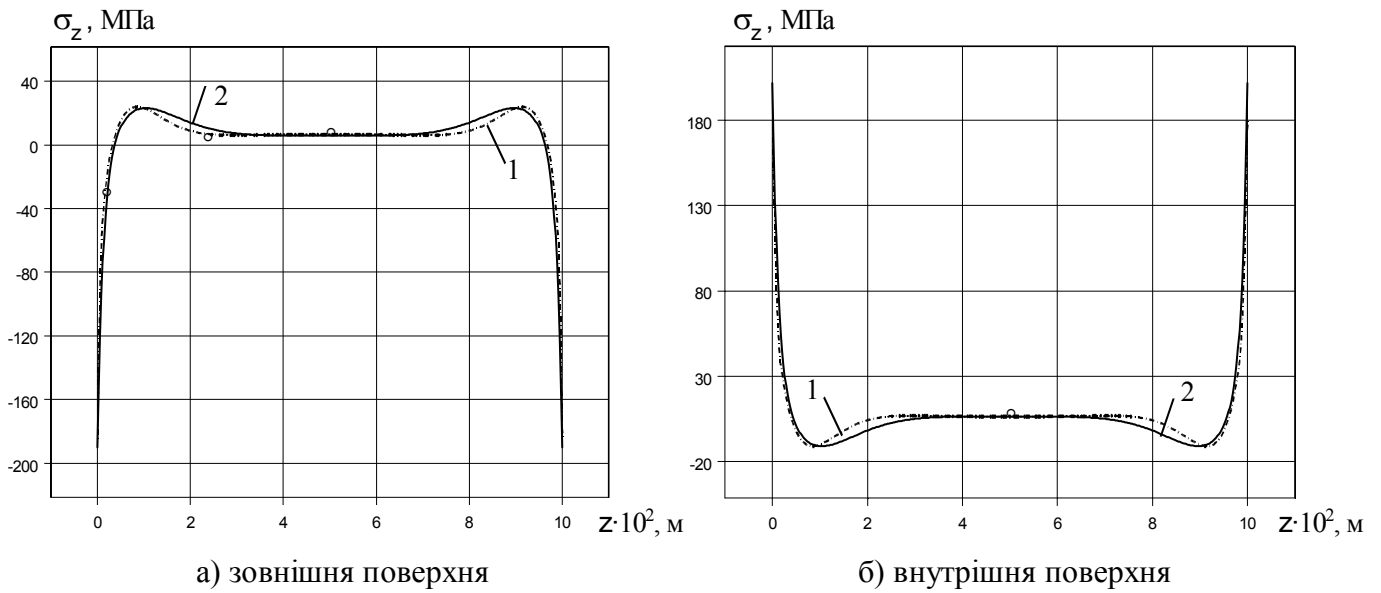


Рис. 3. Графік зміни напружень σ_z уздовж твірних лицьових поверхонь циліндрів (1-ша серія) при жорсткому затисненні торців (1 – перша модель; 2 – третя модель; \circ – дані експерименту; $q = 2,5$ МПа)

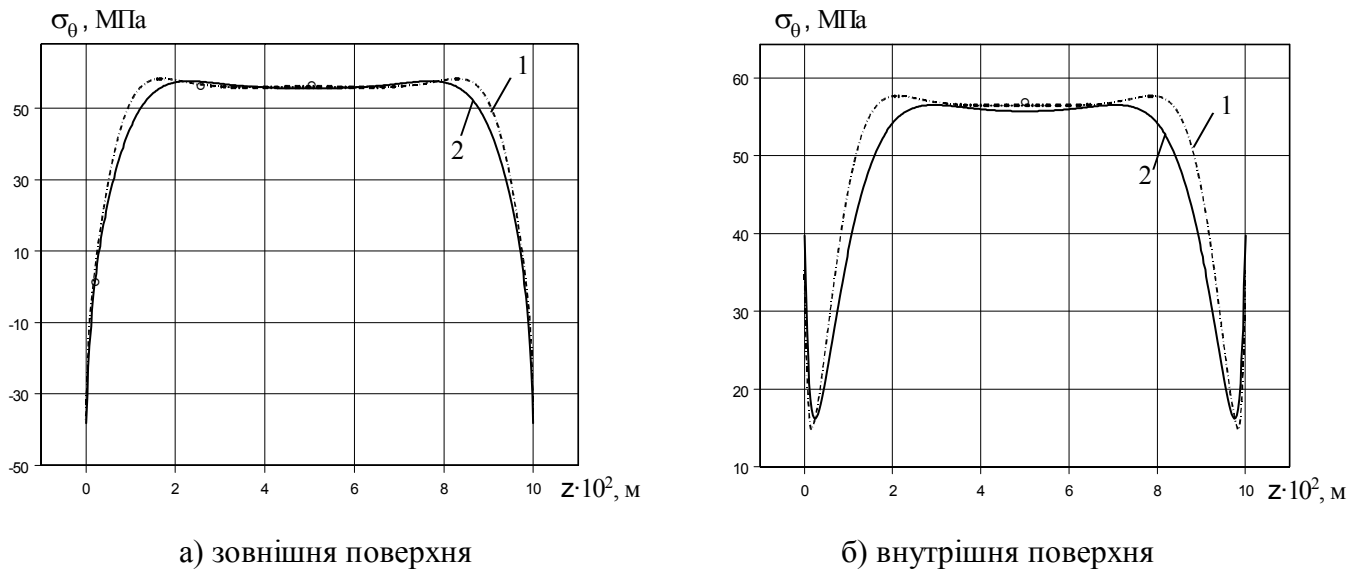


Рис. 4. Графік зміни напружень σ_θ уздовж твірних лицьових поверхонь циліндрів (1-ша серія) при жорсткому затисненні торців (1 – перша модель; 2 – третя модель; \circ – дані експерименту; $q = 2,5$ МПа)

Як показано на рис. 5, а), на відстані товщини оболонки від його торця мають місце значні дотичні напруження, що у поєднанні з нормальним напруженням призводить до руйнування зразків при усередненому значенні інтенсивності внутрішнього тиску $q^* = 2,65$ МПа .

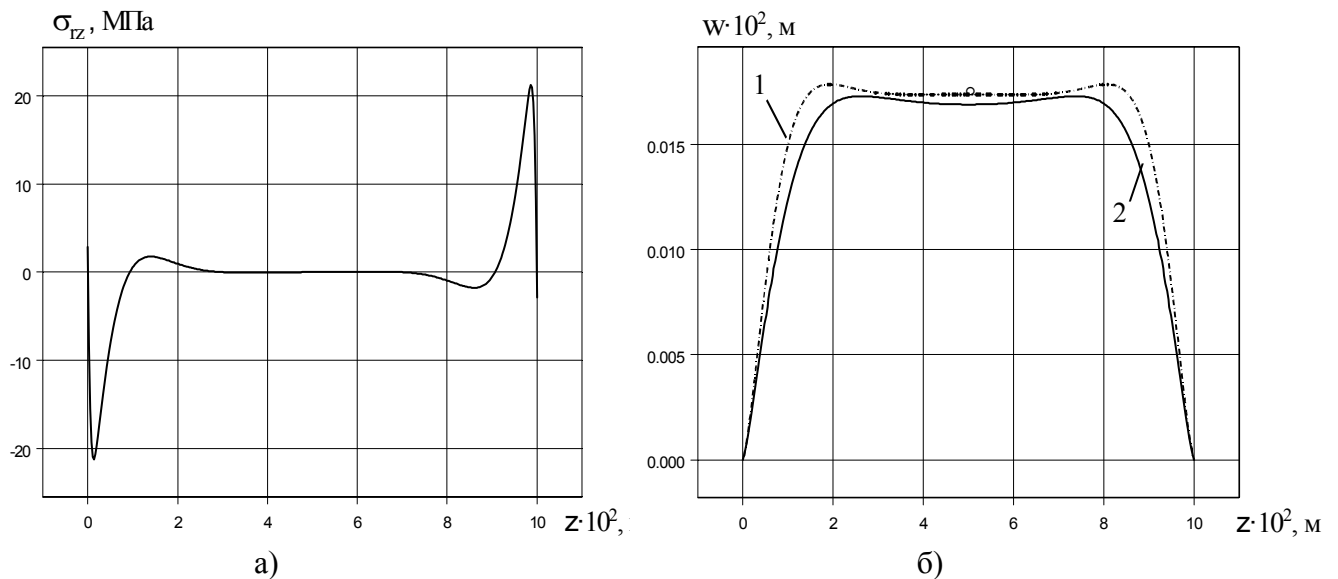


Рис. 5, а). Графік зміни напружень σ_{rz} вздовж твірної серединної поверхні циліндра (1-ша серія) при жорсткому затисненні торців і $q = 2,5$ МПа

Рис.5, б). Графік зміни прогину w вздовж твірної серединної поверхні циліндра (1-ша серія) при жорсткому затисненні торців (1 – перша модель; 2 – третя модель; \circ – дані експерименту; $q = 2,5$ МПа)

У четвертому розділі на основі методу переміщень розроблений алгоритм розв'язання задач конструкційної міцності і несучої здатності тонкостінних осесиметричних конструкцій складної геометрії вздовж меридіана. Досліджений напружено-деформований стан нової конструкції комбінованого балона високого тиску і проведені розрахунки на міцність і несучу здатність з урахуванням контактної взаємодії внутрішньої склопластикової оболонки і металеві оболонки.

За допомогою методу переміщень побудована матриця жорсткості, що встановлює залежність між крайовими зусиллями на торцях s -го тонкостінного елемента оболонки обертання і крайовими переміщеннями цих торців. При цьому замість граничних умов виконуються умови зв'язку з прилеглими до цього елемента частинами конструкції. Розроблений алгоритм, згідно з яким рівняння рівноваги складаються для кожного вузлового елемента, а потім відбувається їх компонування у систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно узагальнених переміщень вузлів оболонки шаруватої структури.

На основі запропонованих розрахункових моделей, а також розглянутих раніше алгоритмів розрахунку такого класу задач на мові програмування ФОРТРАН створений пакет прикладних програм.

Запропонований модифікований поліноміальний критерій міцності для тонкостінних елементів з шаруватих композитів з міжшаровими дефектами структури матеріалу, який містить граничні характеристики шару на поперечний зсув і трансверсальне стиснення (відрив).

Як добре відомо, апроксимація граничної поверхні міцності ортротропного шару в більшості випадків здійснюється поліномом другого степеня

$$R_{ij}\sigma_{ij} + R_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} = 1, \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (2)$$

де R_{ij} , R_{ijkl} – тензори поверхні міцності шару другого і четвертого порядків.

У разі плоского напруженого стану рівняння (2) зображує граничну поверхню (еліпсоїд) у тривимірному просторі напружень

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + 2R_{12}\sigma_{12} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 4R_{1112}\sigma_{11}\sigma_{12} + 4R_{2212}\sigma_{22}\sigma_{12} = 1. \quad (3)$$

Коефіцієнти рівняння (3) визначаються з використанням експериментально встановлених граничних характеристик міцності σ_{ij}^+ , σ_{ij}^- ($i, j = 1, 2$). Індекс «+» означає, що ця компонента – граничне напруження при розтяганні, індексом «-» позначене граничне напруження при стисканні. Для компонент тензорів поверхні міцності (3) мають місце такі співвідношення:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^- - \sigma_{11}^+}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}; \quad R_{22} = \frac{\sigma_{22}^- - \sigma_{22}^+}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}; \quad R_{12} = \frac{\sigma_{12}^- - \sigma_{12}^+}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+}; \quad R_{1111} = \frac{1}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}; \quad (4)$$

$$R_{2222} = \frac{1}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}; \quad 4R_{1212} = \frac{1}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+}; \quad 2R_{1122} = \frac{R_{11} - R_{22}}{\sigma_{12}^-} + R_{1111} + R_{2222} + \frac{1}{(\sigma_{12}^-)^2}.$$

Слід зазначити, що в більшості робіт із дослідження конструкційної міцності армованого матеріалу не враховуються напруження і деформації поперечного зсуву σ_{i3}^- , σ_{i3}^+ ($i = 1, 2$) і трансверсального відриву або стискання σ_{33}^+ , σ_{33}^- . Значна відмінність граничних характеристик несучих шарів і властивостей проміжних міжфазних шарів обумовлює вибір тієї або іншої моделі дискретно-структурної теорії пластин і оболонок. Тому для оцінки міри впливу неідеального міжфазного контакту шарів критерій (2) слід записувати в модифікованому вигляді

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2R_{1133}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2R_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1, \quad (5)$$

де до тензорів поверхні міцності (4) слід аналогічно додати додаткові компоненти:

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}; \quad R_{3333} = \frac{1}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}; \quad 4R_{1313} = \frac{1}{\sigma_{13}^- \sigma_{13}^+}; \quad 4R_{2323} = \frac{1}{\sigma_{23}^- \sigma_{23}^+};$$

$$2R_{1133} = \frac{R_{11} - R_{33}}{\sigma_{13}^-} + R_{1111} + R_{3333} + \frac{1}{(\sigma_{13}^-)^2}; \quad 2R_{2233} = \frac{R_{22} - R_{33}}{\sigma_{23}^-} + R_{2222} + R_{3333} + \frac{1}{(\sigma_{23}^-)^2}. \quad (6)$$

При дослідженні несучої здатності балона розглядалися два етапи руйнування армованої оболонки. На першому визначалася величина тиску, коли відбувається руйнування з'єднувача. Для цього використовувався модифікований поліноміальний критерій міцності (5), що містить поперечні дотичні σ_{i3} ($i = 1, 2$) і трансверсальні напруження σ_{33} .

Подальший розрахунок несучої здатності проводився на основі другої розрахункової моделі оболонки. На другому етапі фіксувався граничний тиск, при якому відбувалося руйнування склопластика в точках внутрішньої поверхні циліндричної оболонки. При цьому замість (5) використовувався критерій міцності (3) для випадку плоского напруженого стану в точці.

Розрахункову модель комбінованого балона високого тиску наведено на рис. 6. У цілому балон складається з двох частин: внутрішня частина – зі склопластика, зовнішня – металева. Комбіновані балони взаємно еквівалентні один одному за масою (табл. 1, № 4 – 7).

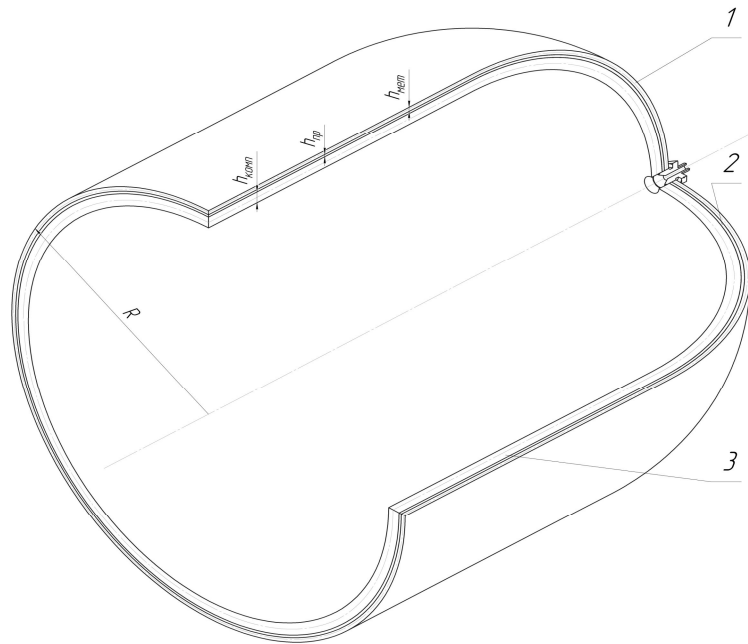


Рис. 6. Розрахункова схема комбінованого балона високого тиску: 1 – захисна металева оболонка (матеріал дюралюміній В-95); 2 – податливий прошарок; 3 – склопластикова несуча оболонка

Товщина склопластикових оболонок $h_1 = 0,0275$ м ; $h_2 = 0,033$ м для першого типорозміру і $h_3 = 0,041$ м для другого. Технічні сталі усього пакета шарів склопластика як композиційного матеріалу з однією площиною пружної симетрії: $E_1 = 2,358 \cdot 10^4$ МПа , $E_2 = 3,747 \cdot 10^4$ МПа , $E_3 = 1,55 \cdot 10^4$ МПа , $\nu_{12} = 0,092$, $\nu_{13} = 0,367$, $\nu_{23} = 0,352$, $G_{12} = 6,702 \cdot 10^3$ МПа , $G_{23} = 3,756 \cdot 10^3$ МПа , $G_{13} = 3,22 \cdot 10^3$ МПа . Захисна металева оболонка виконана з дюралюмінію В-95: $E = 70000$ МПа , $\nu = 0,3$, $\sigma_B = 500$ МПа .

Для виключення контакту склопластикової оболонки з металевою оболонкою передбачений проміжок, який заповнюється ізотропним матеріалом низької густини, наприклад піновінілпластом із такими технічними параметрами: $E = 83$ МПа, $\nu = 0,33$.

З метою вибору оптимальної конструкції був проведений порівняльний аналіз комбінованого балона і газового, виконаного зі склопластика (табл. 1, № 1 – 3). Корисний об'єм балона $V = 0,2 \text{ м}^3$. Склопластикові оболонки двох варіантів балонів еквівалентні за своєю структурою і фізико-механічними характеристикам.

Таблиця 1

Конструкції двох типів балонів із композиційних матеріалів

№ типорозміру	Довжина циліндричної частини, м	Зовнішній радіус циліндра та сфери R, м	Товщина оболонки зі склопластика h_c , м	Товщина проміжку h_3 , м	Товщина захисної металеві оболонки балона h_m , м	Маса виробу, кг
1	2,163	0,188	0,0275	0	0	160
2	2,163	0,188	0,033	0	0	188
3 ^{*)}	0,886	0,257	0,041	0	0	175
4	2,163	0,188	0,02	0,002	0,004	154,5
5	2,163	0,188	0,02	0,004	0,004	160
6	0,886	0,257	0,035	0,004	0,004	180
7	0,886	0,257	0,03	0,004	0,006	165

^{*)}– продукція ВАТ Казанське дослідне конструкторське бюро «СОЮЗ» (Сертифікат відповідності вимогам ISO 9001–2001 № 00107/RU від 19.01.04).

Для даної структури склопластика були прийняті такі значення граничних характеристик міцності матеріалу: $\sigma_{11}^+ = 290 \text{ МПа}$, $\sigma_{22}^+ = 490 \text{ МПа}$, $\sigma_{11}^- = 250 \text{ МПа}$, $\sigma_{22}^- = 390 \text{ МПа}$, $\sigma_{33}^+ = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{33}^- = 150 \text{ МПа}$, $\sigma_{12}^+ = 110 \text{ МПа}$, $\sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^+ = 55 \text{ МПа}$.

Розрахункові значення внутрішнього тиску, при якому на першому етапі відбувається руйнування з'єднувача склопластикової оболонки, а на другому етапі – руйнування конструкції в цілому, наведені в таблиці 2.

Варіюючи жорсткістю склопластикової оболонки, а також вводячи м'який заповнювач між внутрішньою частиною і зовнішньою металеві оболонкою, вдається досягти умов рівномірної роботи матеріалу такої конструкції (комбінований балон). Деформативність склопластикової несучої оболонки в подовжньому напрямку усувається достатньою жорсткою вздовж осі балона металеві захисною оболонкою.

Величини осьового подовження даних типів балонів наведені в таблиці 3.

Значення граничного тиску на першому та другому етапах навантаження

№ типорозміру	Тиск руйнування з'єднувача склопластика p_1 , МПа	Тиск руйнування волокон склопластика p_2 , МПа	Тиск руйнування металевої оболонки за III теорією міцності p_{III} , МПа	Тиск руйнування металевої оболонки за IV теорією міцності p_{IV} , МПа
1	27,90±0,05	58,32±0,005	–	–
2	29,45±0,05	61,93±0,005	–	–
3	28,60±0,05	64,03±0,005	–	–
4	28,10±0,05	58,70±0,005	42,50±0,05	52,00±0,05
5	27,80±0,05	55,36±0,005	54,80±0,05	58,00±0,05
6	29,10±0,05	65,85±0,005	58,05±0,05	62,50±0,05
7	28,60±0,05	62,07±0,005	58,65±0,05	62,55±0,05

Осьове подовження балона

№ типорозміру	Осьове подовження балона, мм	
	при робочому тиску 20 МПа	при тиску руйнування з'єднувача склопластика p_1 , МПа
1	5,96262	8,33476
2	4,83020	7,12792
3	3,30364	4,72836
4	4,80960	6,77318
5	4,65378	6,48584
6	2,71664	3,95952
7	2,60558	3,73440

Зі збільшенням інтенсивності тиску внутрішня склопластикова оболонка (модуль пружності склопластика в три рази нижче за модуль пружності дюралюмінію) практично передає велику частину навантаження на жорсткішу зовнішню металеву оболонку. Початок руйнування даного варіанта комбінованого балона відбувався в зоні крайового ефекту металевої оболонки. Теоретичне значення тиску, при якому відбувалося руйнування металевої оболонки, визначалося на основі третьої (гіпотеза найбільших дотичних напружень) і четвертої (гіпотеза Губера-Мізеса) теорій міцності.

Таким чином, порівняння склопластикових і комбінованих балонів за їх несучою здатністю показало, що останні мають ряд переваг – вони менш деформативні, надійніші в експлуатації і виграють в плані теплоізоляційних властивостей. Вводячи м'який заповнювач між внутрішньою частиною і зовнішньою оболонкою, вдається досягти умов рівномірної роботи матеріалу такої конструкції (комбінований балон).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблений єдиний підхід до розв'язання завдань конструкційної міцності і несучої здатності багат шарових оболонок обертання складної форми. Основні результати роботи полягають в такому.

1. Розроблена нова методика розв'язання геометрично нелінійних контактних задач при розрахунках на міцність багат шарових анізотропних пластин і оболонок з урахуванням як ідеального, так і неідеального контакту між шарами. Створене програмне забезпечення, що дозволяє розв'язувати широкий клас контактних задач, виявлені основні закономірності змінювання напруженого стану й контактного тиску в зоні локальних ділянок непростею або розшарувань.

2. Вивчений вплив дефектів структури матеріалу у вигляді ділянок непростею на напружено-деформований стан і показане виникнення крайового ефекту на границі ділянки непростею.

3. Розроблена й апробована експериментальна методика оцінки достовірності основних положень і результатів роботи.

4. На основі методу переміщень розроблена методика розрахунків оболонок обертання складної форми із шаруватою структурою матеріалу. Уперше запропонована методика розрахунків конструкційної міцності комбінованого балона. Досліджені конструкційна міцність і несуча здатність комбінованого балона високого тиску, який складається з несучої склопластикової оболонки, захищеної з зовнішнього боку металевою оболонкою.

5. Надані рекомендації щодо оптимальних схем армування окремих шарів і ефективних варіантів їх закріплення по контуру, які дозволяють збільшити несучу здатність конструкції в цілому й створити умови рівномірної роботи матеріалу шаруватих елементів без збільшення маси. Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження результатів дисертації при розрахунках конструкцій з композиційних матеріалів для хімічного машинобудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Жигилий Д.А. Напряжённое состояние комбинированного баллона высокого давления в зоне контакта обшивки и внутренней стеклопластиковой оболочки / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2005. – № 1 (73). – С. 134 – 139.
2. Жигилий Д.А. Экспериментальные исследования тонкостенных элементов из композиционных материалов с технологическими дефектами структуры / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2005. – № 12 (84). – С. 171 – 180.
3. Жигилий Д.А. Напряженное состояние цилиндров слоистой структуры с межфазными дефектами / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 21. – С. 41 – 49.
4. Жигилий Д.А. Экспериментальные исследования многослойных цилиндров на действие внутреннего гидростатического давления / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2008. – № 1. – С. 54 – 61.
5. Жигилий Д.А. Несущая способность комбинированных баллонов высокого давления. / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий, А.В. Стрелец // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – № 56. – С. 62– 72 (сер. Машинобудування, №56).
6. Жигилий Д.А. Конструкционная прочность комбинированных баллонов высокого давления / Д.А. Жигилий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – № 37. – С. 79 – 88.
7. Жигилий Д.А. Несущая способность двух типов баллонов высокого давления / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий, А.В. Стрелец // Вісник СевНТУ. Вип. 110: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. / редкол.: О.І. Болохонський (відп. ред.) та ін.; Севастоп. нац. техн. унт. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 179–183.
8. Жигилий Д.А. Определение напряженно-деформированного состояния комбинированного баллона высокого давления / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий // Компрессорная техника и пневматика в XXI веке: XXIII международная научно-техническая конференция по компрессоростроению. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. – Т. 3. – С. 164 – 170.
9. Жигилий Д.А. Напряжённое состояние тонкостенных элементов из композиционных материалов с технологическими дефектами структуры / С.М. Верещака, Д.А. Жигилий: труды 11 международной научно-технической конференции «Герметичность, виброненадежність

экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования». – Сумы, 2005. – Т.3. – С. 253 – 263.

АНОТАЦІЯ

Жигилій Д.О. Конструкційна міцність комбінованих балонів високого тиску. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.02.09 – динаміка і міцність машин. – Сумський державний університет, Суми 2010.

На основі дискретно-структурної теорії анізотропних пластин і оболонок розроблена методика розв'язання геометрично нелінійних контактних задач при розрахунку на міцність багатошарових анізотропних пластин і оболонок з урахуванням як ідеального, так і неідеального контакту між шарами. Отримано розв'язок широкого класу контактних задач, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану і контактного тиску в зоні локальних ділянок непростого або розшарувань. Вивчений вплив структурної неоднорідності шаруватого матеріалу на макрорівні із застосуванням алгоритму поетапного навантаження і застосування того або іншого варіанта запропонованих розрахункових моделей багатошарової конструкції. Перехід від одного варіанта розрахункової моделі до іншого визначається умовами міцності композиту в точках поверхні сполучення найбільш навантажених шарів конструкції. З метою оцінки достовірності основних положень і результатів роботи проведені експериментальні дослідження і отримано числові розв'язки тестових задач. На основі методу переміщень розроблена методика розрахунку конструкційної міцності і несучої здатності оболонок обертання складної форми з шаруватою структурою матеріалу. Вивчені конструкційна міцність і несуча здатність комбінованого балона високого тиску, що складається із склопластикової несучої оболонки, захищеної з зовнішнього боку металеву оболонкою.

Ключові слова: конструкційна міцність, несуча здатність, комбінований балон, дискретно-структурна теорія, міжшарові дефекти структури матеріалу, модифікований критерій міцності.

АННОТАЦИЯ

Жигилий Д.А. Конструкционная прочность комбинированных баллонов высокого давления. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Сумский государственный университет, Сумы 2010.

На основе дискретно-структурной теории анизотропных пластин и оболочек разработана методика решения геометрически нелинейных контактных задач при расчёте на прочность многослойных анизотропных пластин и оболочек с учетом как идеального, так и неидеального контакта между слоями. Получено решение широкого класса контактных задач, выявлены

основные закономерности изменения напряженного состояния и контактного давления в зоне локальных участков несклеиваний или расслоений. Изучено влияние структурной неоднородности слоистого материала на макроуровне с применением алгоритма поэтапного нагружения и применения того или иного варианта предлагаемых расчетных моделей многослойной конструкции. Переход от одного варианта расчетной модели к другому определяется условиями прочности композита в точках поверхности сопряжения наиболее нагруженных слоев конструкции. С целью оценки достоверности основных положений и результатов работы проведены экспериментальные исследования и получено численное решение тестовых задач. На основе метода перемещений разработана методика расчета конструкционной прочности и несущей способности оболочек вращения сложной формы со слоистой структурой материала. Изучены конструкционная прочность и несущая способность комбинированного баллона высокого давления, состоящего из несущей стеклопластиковой оболочки, защищенной с внешней стороны металлической оболочкой.

Ключевые слова: конструкционная прочность, несущая способность, комбинированный баллон, дискретно-структурная теория, межслойные дефекты структуры материала, модифицированный критерий прочности.

ANNOTATION

Zhigily D.O. Structural strength of the combined high-pressure cylinder. - Manuscript.

Thesis for a Candidate degree in Technical Science in speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. – Sumy State University, Sumy, 2010.

Based on discrete-structural theory of anisotropic plates and shells, methodology of geometrically nonlinear contact problem solving is developed. This problem appears during a strength design of multi-layered anisotropic plates and shells with a glance to both ideal and nonideal contact between layers. Solutions of wide class of contact problems are found. The basic mechanism of deflected mode and contact pressure changes in the area of starved spots and delaminations is revealed. The influence of structure inhomogeneity of multilayer material is studied at the macrolevel with the use of algorithm of stage-by-stage loading and choosing of one or another variant of the offered multilayered structure calculation models. An adoption of one calculation model to another one is determined by the terms of composites strength in the junction surface points of the most loaded layers of the construction. Experimental researches are led and numerical solving of the test problems is got for conceptual issues and efforts authenticity estimation. The methodology of structural strength and load-carrying ability calculation of difficult form layered rotation shells based on deflection method is offered. Structural strength and load-carrying ability of the hybrid high-pressure balloon are studied. This combined high-pressure cylinder consists of load-bearing glass-fibre plastic shell and external protective metal shell.

Key words: structural strength, load-carrying ability, combined cylinder, discrete-structural theory, interlaminar defects, modified strength criterion.