

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Дейнека Андрій Віталійович

УДК 539.3

**КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ БАГАТОШАРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
МАШИН З ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРИ**

05.02.09 – Динаміка та міцність машин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті  
Міністерства освіти і науки 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» (м. Харків),  
завідувач кафедри динаміки та міцності машин;

кандидат технічних наук  
**ЛЕВАШОВ Віктор Олександрович**,  
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО ім. М.В. Фрунзе»,  
провідний науковий співробітник СКБ ТКМ, м. Суми.

Захист відбудеться «26» червня 2015 р. о 13 годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 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 « 26 » травня 2015 р.

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

Є.М. Савченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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, а також виключає застосування антикорозійних захисних властивостей та зварювальних робіт.

Перспективним напрямком застосування конструкцій з композиційних матеріалів є заміна металевих газових балонів композитними. Європейські компанії наповнюють, зберігають і транспортують приблизно 40 млн. балонів, обслуговуючи потреби ринку технічних газів.

Ще одним прикладом доречності застосування композитів являються ущільнення робочих коліс насосів, які працюють з легкими вуглеводнями. Ці насоси наражаються на декілька загроз. По перше, легкі вуглеводні не мають властивостей, достатніх для забезпечення змащення між деталями, що обертаються, та нерухомими деталями. Також більшість виробничих процесів з легкими вуглеводнями проходять при таких умовах, які створюють ймовірність роботи насоса насухо. При цьому від тертя на поверхнях контакту ущільнень виникають значні температурні навантаження. Для усунення таких загроз пропонується використання композиційних матеріалів під час виготовлення ущільнень.

Таким чином, інтенсивне впровадження нових композиційних матеріалів у різноманітні галузі сучасної техніки викликане високими техніко-економічними показниками конструкцій, створених на їх основі.

При виготовленні й експлуатації багат шарових конструкцій на міжшарових поверхнях контакту жорстких армованих шарів утворюється тонкий клейовий прошарок, а також різного роду структурні недосконалості, наприклад ділянки непроклею або відшарувань. Специфічними особливостями багат шарових 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 багат шарових 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.

Із-за складності чисельної реалізації розглянутих задач, отримані теоретичні результати потребують експериментальної перевірки, особливо, якщо досліджується несуча здатність багат шарових тонкостінних елементів конструкцій з урахуванням різного роду початкових дефектів структури матеріалу.

Тому розробка нових методик розрахунку напружено-деформованого стану багат шарових 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.

**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 держбюджетних науково-дослідницьких робіт: «Несуча здатність комбінованого газового балона високого тиску» (0110U004017), «Дослідження робочого процесу та розробка теорії нових енергоефективних та ресурсозберігаючих конструкцій ущільнень відцентрових машин» (0113U000135).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку термопружного напруженого стану склопластикових труб, композитних балонів високого тиску та ущільнень робочих коліс насосів з урахуванням міжшарових дефектів структури матеріалу.

Для досягнення поставленої мети в дисертації було поставлено наступні задачі:

- провести аналіз різних розрахункових моделей і методик розрахунку напружено-деформованого стану багатошарових елементів конструкцій з дефектами структури від дії статичних та температурних навантажень, визначити особливості існуючих методик експериментальних досліджень таких конструкцій;

- на основі дискретно-структурної теорії створити 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);

- розробити теоретико-експериментальну методику визначення інтегральних термопружних характеристик композитів шаруватої структури, відповідно до дискретно-структурної моделі багатошарових оболонок і пластин розробити методику визначення коефіцієнту проковзування сполучених поверхонь суміжних шарів, коли порушуються умови їх ідеального кінематичного контакту, та на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла розробити 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;

- виготовити експериментальну установку і дослідити деформований стан циліндричних оболонок зі склопластику і композиційних труб з дефектами структури методом тензометрування;

- розв'язати задачу міцності і отримати величину граничного внутрішнього тиску комбінованих газових балонів високого тиску, дослідити напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні фланцевих з'єднань в залежності від жорсткості фланців.

**Об'єкт дослідження** – процес навантаження і деформування багат шарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури.

**Предмет дослідження** – термопружний деформований стан склопластикових труб, комбінованих балонів високого тиску, силова оболонка яких виконана з композиційного матеріалу шаруватої структури, композитних ущільнень робочого колеса насоса.

**Методи дослідження.** Для розв'язання термопружної незв'язаної задачі застосовуються метод сплайн-колокацій, 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 багат шарових 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.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у такому:

- відповідно дискретно-структурної моделі багат шарових оболонок і пластин дістало подальший розвиток дослідження термопружного стану багат шарових 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);

- побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування композитної оболонки шаруватої структури, 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;

- вперше отримано нові чисельно-аналітичні розв'язки термопружної крайової задачі деформації циліндричних оболонок обертання шаруватої структури від дії внутрішнього тиску і температурного навантаження з неідеальним міжшаровим контактом, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану при врахуванні проковзування суміжних шарів по сполученим поверхням, визначено інтегральні коефіцієнти теплового лінійного розширення багат шарового анізотропного матеріалу;

- вперше встановлено вплив температурних навантажень на напружено-деформований стан ущільнення робочого колеса, виготовленого із композиційних матеріалів;

- дістало подальший розвиток дослідження впливу жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні їх з'єднань.

**Практичне значення отриманих результатів.** 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 термопружних крайових задач також використовуються в навчальному процесі Сумського державного університету, для студентів напрямку підготовки «Механіка» та магістрів спеціальності «Комп'ютерна механіка».

**Особистий внесок здобувача.** Дані до захисту положення дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. У публікаціях, виданих у співавторстві, здобувачу належать наступні наукові результати:

[1] – визначення розрахункової моделі багат шарового криволінійного бруса, коли має місце пружне проковзування сполучених поверхонь сусідніх шарів, та доведення адекватності такої моделі;

[2] – проведення експерименту і визначення експериментальних даних щодо впливу жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб в зоні їх з'єднання;

[3] – проведення розрахунку на конструкційну міцність та граничний стан торових армованих оболонок із міжшаровими дефектами структури матеріалу;

[4-7] – складення алгоритму і розв'язання крайової задачі термопружного деформованого стану циліндричної товстостінної багат шарової оболонки від дії внутрішнього тиску і температурного навантаження.

**Апробація результатів дисертації.** Зміст основних розділів і окремих результатів роботи доповідався на наступних конференціях: Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції “Сучасні технології в промисловому виробництві” (Суми, 2012); Міжнародній науково-технічній конференції “Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций” (Севастополь 2012, 2013); XIV-й Міжнародній науково-технічній конференції “Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования” (Суми, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції “Технология XXI века” (Южне, 2014), Міжнародній науково-технічній конференції “Теория та практика рационального проектирования, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (Львів, 2014).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, із них 6 статей у фахових наукових виданнях України, 1 стаття в зарубіжному виданні і 4 – у збірниках праць науково-технічних конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел (149 найменувань), висновків і додатка (на 2 сторінках). Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок, 53 рисунки та 4 таблиці по тексту. Обсяг основного тексту дисертації становить 146 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**Перший розділ** містить аналіз методик розрахунку і моделей напружено-деформованого стану багат шарових композитів з дефектами структури від дії температурних навантажень, всебічний літературний огляд експериментальних досліджень для порівняння ефективності таких моделей.

Проблема міцності шаруватих тонкостінних конструкцій з дефектами структури матеріалу привертає останніми роками все більшу увагу дослідників унаслідок їхньої практичної значущості. Існуючі до сьогодні дослідження

характеризуються більшою різноманітністю підходів, математичних моделей анізотропних конструкцій, рівнем строгості розв'язку задач, а також методами їх розв'язання.

Вагомий внесок у розвиток класичної й уточнених некласичних теорій анізотропних пластин та оболонок, обґрунтування запропонованих некласичних моделей і встановлення зв'язку між ними і просторовими задачами теорії пружності містяться у працях вітчизняних і зарубіжних учених: Н.П. Абовського, С.О. Амбарцумяна, І.Ю. Бабича, 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. Хатчінса (C.I. Hutchins), А.К. Нура (A.K. Noor), Н.Дж. Пейгано (N.J. Pagano), Дж.Н. Редді (J.N. Reddy) та інших.

Відзначено два протилежні підходи до побудови двовимірних рівнянь теорії шаруватих структур – структурно-безперервний (континуальний) і дискретно-структурний. Відповідно до структурно-безперервного підходу кусково-неоднорідна по товщині шарувата пластина або оболонка розглядається як квазіоднорідна зі зведеними пружними характеристиками. Порядок отриманих для розв'язання рівнянь не залежить від числа шарів. Дискретно-структурна теорія враховує неоднорідність структури оболонки введенням кінематичних або статичних гіпотез для кожного окремого шару. Порядок рівнянь при такому підході залежить від кількості шарів. Дискретно-структурний підхід дозволяє враховувати локальні ефекти на поверхнях контакту шарів і, як правило, застосовується при розрахунках багат шарових 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.

У працях С.О. Амбарцумяна, А.Н. Андрєєва, О. М. Гузя, Л.Г. Белозерова, 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. Немировського, 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), Дж. Кларка (G. Clark) та інших авторів показано, що існує 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. Другий шлях уявляється ліпшим як з теоретичної, так і практичної точки зору.

Незв'язана задача термопружності багатошарових композитів відповідно структурно-безперервного підходу розглядалась 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.

Специфічними особливостями багатошарових конструкцій з композитних матеріалів є різко виражена анізотропія їх деформативних властивостей, відносно низький опір поперечним та трансверсальним деформаціям, істотна відмінність механічних і теплофізичних характеристик шарів. При розгляданні деформування багатошарових конструкцій із композиційних матеріалів під час дії температурних навантажень окремим завдання є вивчення закономірностей розподілу теплового потоку у кожному шарі такої конструкції.

Більшість робіт з міцності конструкцій із дефектами структури типу непроклею або розшарувань виконана, як правило, у рамках наближених розрахункових схем. Через складність числової реалізації розглянутих задач переважна частина публікацій з питань міцності багатошарових систем із дефектами структури мають більш теоретичний характер. Практично відсутні роботи, у яких на основі методів математичної статистики проводиться обробка числових і експериментальних результатів щодо впливу різного роду дефектів структури на характеристики несучої здатності тонкостінних конструкцій з композитів.

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 багатошарових оболонок і пластин із дефектами структури матеріалу по товщині. 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 поверхах такої оболонки.

Багатошарова 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.

Вектори  $\vec{u}^{(k)}$ ,  $\vec{\gamma}^{(k)}$ ,  $\vec{\psi}^{(k)}$  в ортогональній криволінійній системі координат записуються у такому вигляді:

$$\vec{u}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} u_i^{(k)} + \vec{m}^{(k)} w^{(k)}; \quad \vec{\gamma}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} \gamma_i^{(k)} + \vec{m}^{(k)} \gamma^{(k)}; \quad \vec{\psi}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} \psi_i^{(k)}. \quad (2)$$

Тензори деформацій у точці  $(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, z^{(k)})$  визначаються як напіврізниці метричних тензорів до і після деформації:

$$2\varepsilon_{ij}^{(k)z} = g_{ij}^{(k)*} - g_{ij}^{(k)}, \quad 2\varepsilon_{i3}^{(k)z} = g_{i3}^{(k)*} - g_{i3}^{(k)}, \quad 2\varepsilon_{33}^{(k)z} = g_{33}^{(k)*} - 1. \quad (3)$$

Відповідно до теорії середнього згину анізотропних пластин і оболонок для анізотропного шару отримані нелінійні геометричні співвідношення (3) в ортогональних криволінійних координатах набувають вигляду:

$$\varepsilon_{ij}^{(k)z} = \varepsilon_{ij}^{(k)} + z^{(k)} \chi_{ij}^{(k)}, \quad 2\varepsilon_{i3}^{(k)z} = \omega_i^{(k)} + \gamma_i^{(k)} + \varphi^{(k)'}(z) \psi_i^{(k)}, \quad \varepsilon_{33}^{(k)z} = \gamma^{(k)}, \quad (4)$$

де

$$2\varepsilon_{ij}^{(k)} = e_{ij}^{(k)} + e_{ji}^{(k)} + \omega_i^{(k)} \omega_j^{(k)}, \quad 2\chi_{ij}^{(k)} = \chi_{ij}^{(k)\gamma} + \chi_{ji}^{(k)\gamma} + f^{(k)}(z) \psi_{ij}^{(k)} + f^{(k)}(z) \psi_{ji}^{(k)} \quad (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (5)$$

$$e_{11}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{A^{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} - \frac{1}{A^{(k)} B^{(k)}} \cdot \frac{\partial A^{(k)}}{\partial \alpha_1^{(k)}} u_2^{(k)} + k_1^{(k)} w^{(k)}, \quad e_{12}^{(k)} = \frac{\partial u_2^{(k)}}{A^{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} - \frac{u_1^{(k)}}{A^{(k)} B^{(k)}} \cdot \frac{\partial A^{(k)}}{\partial \alpha_2^{(k)}},$$

$$\omega_1^{(k)} = \frac{\partial w^{(k)}}{A^{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} - k_1^{(k)} u_1^{(k)},$$

$$\chi_{11}^{(k)\gamma} = \frac{\partial \gamma_1^{(k)}}{A^{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} + \frac{\gamma_2^{(k)}}{A^{(k)} B^{(k)}} \frac{\partial A^{(k)}}{\partial \alpha_2^{(k)}} + k_1^{(k)} e_{11}^{(k)}, \quad \psi_{11}^{(k)} = \frac{\partial \psi_1^{(k)}}{A^{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} + \frac{\psi_2^{(k)}}{A^{(k)} B^{(k)}} \cdot \frac{\partial A^{(k)}}{\partial \alpha_2^{(k)}},$$

$$2\chi_{12}^{(k)\gamma} = \frac{B^{(k)}}{A^{(k)}} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_1^{(k)}} \left( \frac{\gamma_2^{(k)}}{B^{(k)}} \right) + \frac{A^{(k)}}{B^{(k)}} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_2^{(k)}} \left( \frac{\gamma_1^{(k)}}{A^{(k)}} \right) + k_1^{(k)} e_{21}^{(k)} + k_2^{(k)} e_{12}^{(k)},$$

$$2\psi_{12}^{(k)} = \frac{B^{(k)}}{A^{(k)}} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_1^{(k)}} \left( \frac{\psi_2^{(k)}}{B^{(k)}} \right) + \frac{A^{(k)}}{B^{(k)}} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_2^{(k)}} \left( \frac{\psi_1^{(k)}}{A^{(k)}} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2; A^{(k)} \leftrightarrow B^{(k)}), \quad (6)$$

де  $\varphi^{(k)}(z) = z^{(k)} f^{(k)}(z)$ ,  $\varphi^{(k)'}(z) = \frac{\partial \varphi^{(k)}(z)}{\partial z^{(k)}}$ ;  $A^{(k)}$ ,  $B^{(k)}$ ,  $k_1^{(k)}$ ,  $k_2^{(k)}$  – коефіцієнти першої квадратичної форми серединної поверхні й головних кривизн  $k$ -го шару відповідно.

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 багат шарових 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.

Унаслідок того, що між жорсткими шарами в процесі виготовлення армованих оболонок утворюється міжфазний м'який клейовий прошарок. При цьому вважається, що його товщина дорівнює нулю. Тоді відповідно до першого варіанта 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  $\bar{q}_{(k)}$ ,  $\bar{q}_{(k+1)}$  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 теплопровідності для багатошарової оболонки, яка складається з  $n$ -анізотропних криволінійних шарів з різними теплофізичними властивостями. Наведена задача теплопровідності 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** на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла досліджується напружено-деформований стан багатошарового порожнистого циліндру кінцевої довжини під дією внутрішнього тиску і температурного навантаження. При розрахунку враховуються наближені до реальних умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових границях. Задача розглядається в осесиметричній постановці.

У разі, коли композит є набором  $n$  по-різному орієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, запропонована методика визначення зведених інтегральних термопружних характеристик і 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 багатошарового композита.

Для розв'язання поставленої задачі були складені рівняння рівноваги, фізичні та геометричні співвідношення, а також рівняння теплопровідності. За допомогою добре відомого підходу, побудованого на основі сплайн-апроксимації розв'язків у напрямі утворюючої або розкладання розв'язків у тому ж напрямі в ряди Фур'є, розглянута задача зводиться до одновимірної. Розв'язання отриманої системи звичайних диференціальних рівнянь знаходиться за допомогою розкладання наведених розв'язків у ряди Тейлора у радіальному напрямку відповідно для кожного шару циліндричної оболонки. Доповнюючи

отриману систему алгебраїчних рівнянь механічними та температурними граничними умовами ідеального та неідеального контакту у точках сполучених поверхонь сусідніх шарів, неважко отримати остаточний розв'язок задачі.

Слід зазначити, що між різницею переміщень точок сполучених поверхонь сусідніх шарів і дотичними напруженнями у поздовжньому напрямку існує залежність  $u_{\theta}^{(i)}(a_i, \theta) - u_{\theta}^{(i+1)}(a_i, \theta) = k^{(i)} \tau_{r\theta}^{(i)}$ . У загальному випадку  $k^i$  – заданий параметр, який визначається шляхом чисельних та експериментальних досліджень. Як граничні значення з цього рівняння постають два варіанти:  $1/k^i = 0$  – спостерігається ідеальне прослизання суміжних шарів,  $k^i = 0$  – ідеальний контакт. Вважається, що радіальні напруження й переміщення при переході через поверхню розділу шарів стрибка не мають.

Для визначення параметру  $k^i$  була розглянута задача знаходження напружено-деформованого стану плоского криволінійного бруса при згинанні. Вважалося, що брус складається із трьох односпрямованих шарів ( $N = 3$ ). Порівняння отриманих теоретичних розрахунків з експериментальними результатами, показує, що найбільш адекватно реальну картину напружено-деформованого стану розглянутого криволінійного бруса відображає дискретно структурна теорія з урахуванням неідеального контакту шарів, коли  $k^i = 4$ .

Розв'язана задача термопружного деформованого стану багат шарового циліндру, на кінцях якого виконуються умови вільного опирання. Розв'язки знаходились за допомогою розкладання переміщень і температури в ряди Фур'є. Геометричні параметри багат шарового кругового порожнистого циліндра  $r_a = 0,148$  м,  $r_b = 0,18$  м и  $l = 1$  м. Температурні навантаження на внутрішній і зовнішній поверхнях, а також внутрішній і зовнішній тиск, задані в наступному вигляді:

$$T_a(z) = 0, T_b(z) = \Delta T \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right), \quad q_a(z) = q_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right), q_b(z) = 0.$$

Циліндр складається з 4 шарів:

- 1) твердий поліетилен високого тиску ( $h=4$ мм) –  $E=260$ МПа,  $\nu=0,4$ ,  $\lambda=0,44$ Вт/м·К,  $\alpha = 20 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>;
- 2) склопластик ( $h=20$ мм) –  $\lambda = 0,4$ Вт/м·К,  $\alpha = 4 - 7 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>;
- 3) пеновінілпласт ( $h=4$ мм) –  $E=83$ МПа,  $\nu=0,33$ ,  $\lambda=0,4$ Вт/м·К,  $\alpha=15 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>;
- 4) дюралюміній ( $h=4$ мм) –  $E=71$ ГПа,  $\nu=0,31$ ,  $\lambda=160$ Вт/м·К,  $\alpha=2,3 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>.

Тут прийняті позначення:  $E$  – модуль пружності першого роду,  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

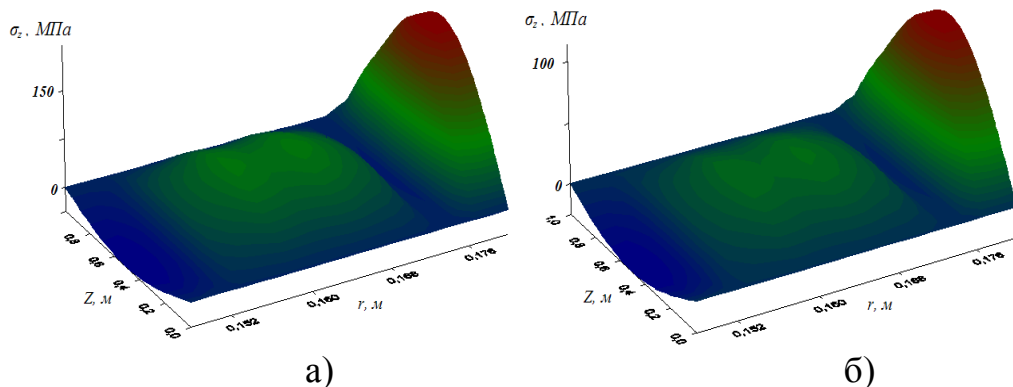


Рисунок 1 – Розподіл осьових напружень в циліндрі ( $q_0=50$ МПа):  
а)  $\Delta T=80$ К; б)  $\Delta T=50$ К

Аналіз результатів, показаних на рис. 1-3, дозволяє відзначити наступне. Максимальні нормальні напруження в поздовжньому напрямі (рис. 1) у зовнішньому шарі з дюралюмінію зростають на 61% при збільшенні температури на 30 К і на 54% в несучому шарі зі склопластику.

При аналізі зміни нормальних напружень в коловому напрямі циліндра (рис. 2) при збільшенні температури на 30 К відзначається зменшення зазначених напружень на 7% у зовнішньому шарі і на 3% в несучому шарі. Таким чином, слід зазначити, що температурні навантаження мають незначний вплив на величину максимальних значень колових напружень.

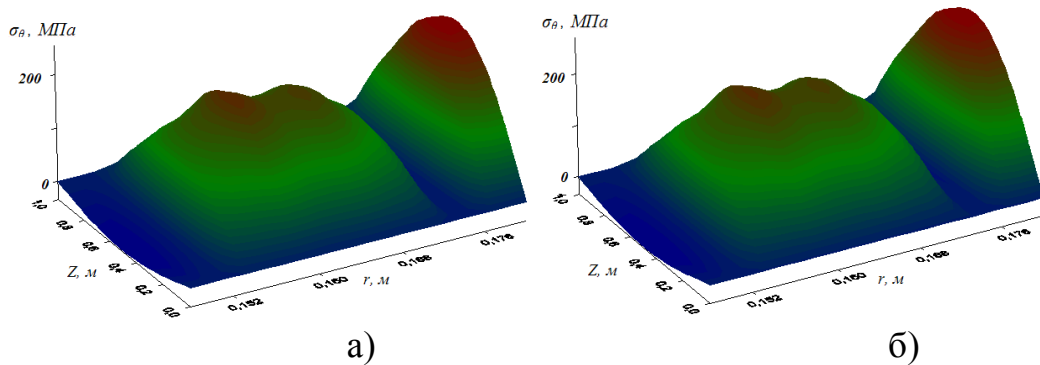


Рисунок 2 – Розподіл колових напружень в циліндрі ( $q_0=50\text{МПа}$ ):  
а)  $\Delta T=80\text{К}$ ; б)  $\Delta T=50\text{К}$

З рис. 3 видно, що напруження поперечного зсуву мало залежать від температури, але, як відомо, навіть невеликі напруження поперечного зсуву при наявності стискаючих або розтягувальних трансверсальних напружень можуть привести до розшарування розглянутого багатшарового циліндру.

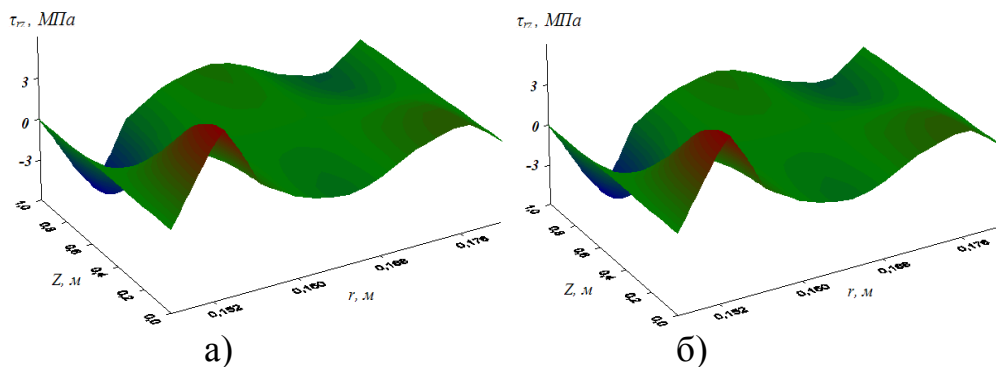


Рисунок 3 – Розподіл напружень поперечного зсуву в циліндрі  
( $q_0=50\text{МПа}$ ): а)  $\Delta T=80\text{К}$ ; б)  $\Delta T=50\text{К}$

Запропонований алгоритм розв'язку, розглянутого класу задач, дозволяє отримувати розрахункові дані для оцінки впливу фізико-механічних характеристик окремих шарів на термопружний деформований стан неоднорідних по товщині циліндрів. Наведений чисельно-аналітичний підхід дозволяє розв'язувати задачі термопружності деформованого стану багатшарового циліндру тільки за умови вільного обпирання його торців.

Розглянемо приклад, коли для товстостінного склопластикового циліндру довжиною  $l=2\text{ м}$ , з внутрішнім радіусом  $r_a=0,156\text{ м}$  і зовнішнім радіусом

$r_b=0,188\text{ м}$ , на торцях має місце шарнірне закріплення. Розв'язки знаходились за допомогою методу сплайн-колокації. Циліндр навантажений внутрішнім тиском і температурою на зовнішній лицьовій поверхні, тому:

$$q_a(z) = q_0 = 20\text{ МПа}, q_b(z) = 0, T_a(z) = 0, T_b(z) = \Delta T.$$

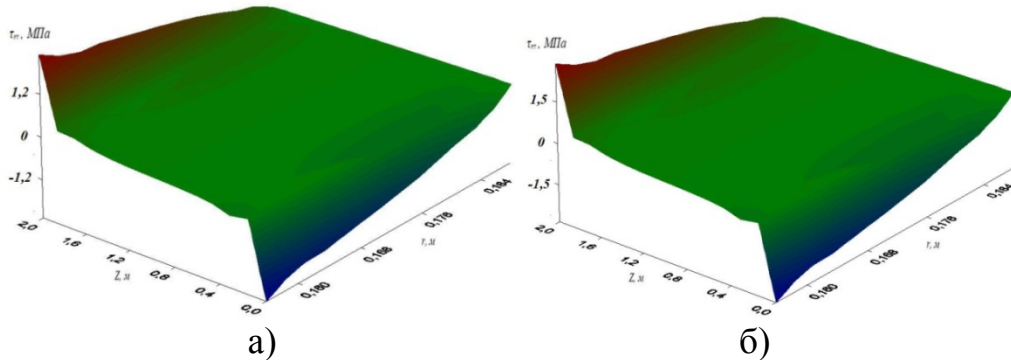


Рисунок 4 – Розподіл напружень поперечного зсуву в циліндрі:  
а)  $\Delta T=0\text{ К}$ ; б)  $\Delta T=50\text{ К}$

З рис. 4 видно, що напруження поперечного зсуву значно залежать від температури на торцях шарнірно закріпленого циліндру, що може привести до розшарування розглянутого багат шарового циліндру.

На рис. 5 зображений розподіл нормальних колових напружень в центрі циліндру ( $z=1\text{ м}$ ) та радіальних переміщень в зоні контакту пакетів склопластикових шарів циліндру при врахуванні як внутрішнього тиску  $p=20\text{ МПа}$ , так і температурного навантаження  $\Delta T=50\text{ К}$ . Суцільною лінією позначений випадок ідеального контакту шарів, штриховою – неідеального ( $K=4$ ).

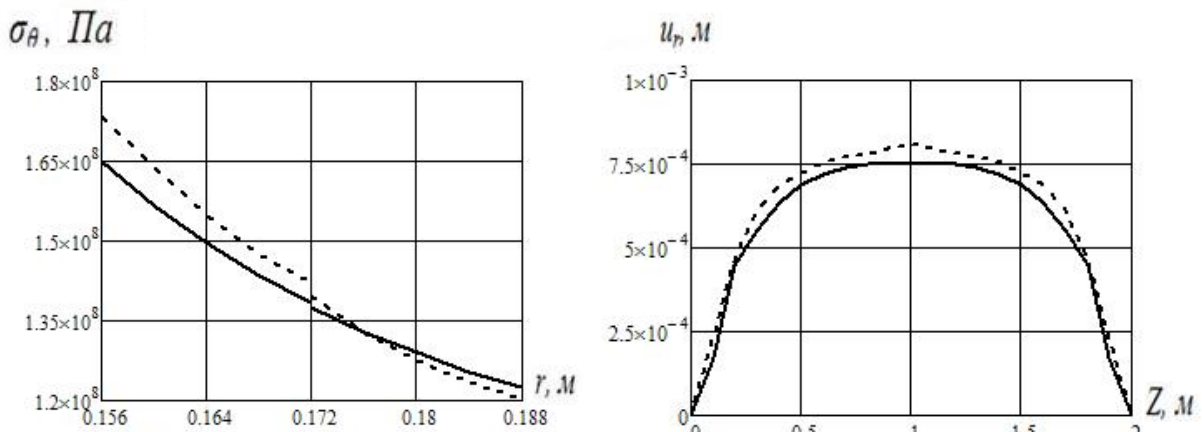


Рисунок 5 – Розподіл нормальних колових напружень і радіальних переміщень в циліндрі

Аналіз отриманих результатів дозволяє відзначити, що під час урахування неідеального контакту між шарами, величина нормальних колових напружень на внутрішній лицьовій поверхні циліндру на 10-12% більша ніж при ідеальному контакті. Також на 6-7% збільшується величина радіальних переміщень в зоні контакту.

Ще одним прикладом циліндричної багат шарової оболонки є ущільнення робочого колеса насоса. Ущільнююче кільце складається з 3 шарів. Розглядалося два варіанти ущільнення: в першому кільце виготовлене зі склопластику, в другому – з вуглепластику. В результаті роботи насоса в нерозрахунковому режимі, на внутрішній поверхні кільця з'являється теплове навантаження:

$$T_a(z) = \Delta T \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right), T_b(z) = 0.$$

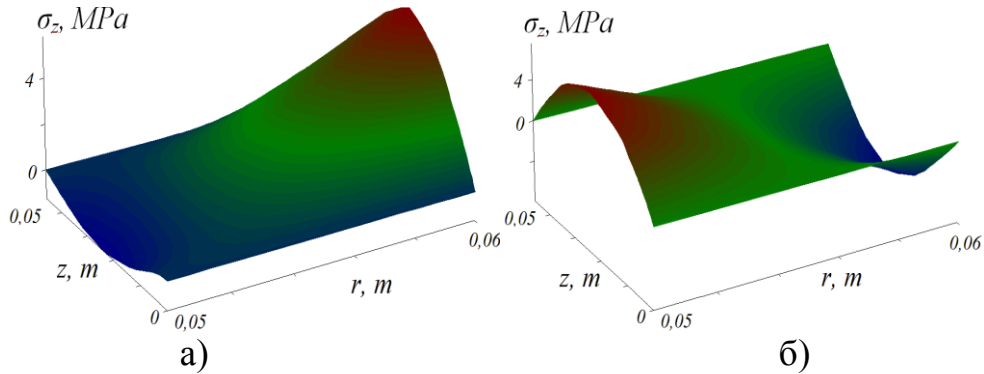


Рисунок 6 – Розподіл осьових напружень: а) склопластик; б) вуглепластик

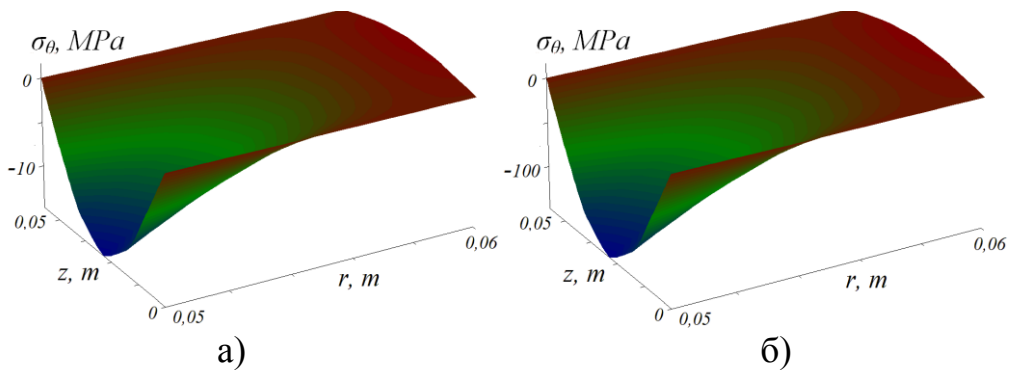


Рисунок 7 – Розподіл колових напружень: а) склопластик; б) вуглепластик

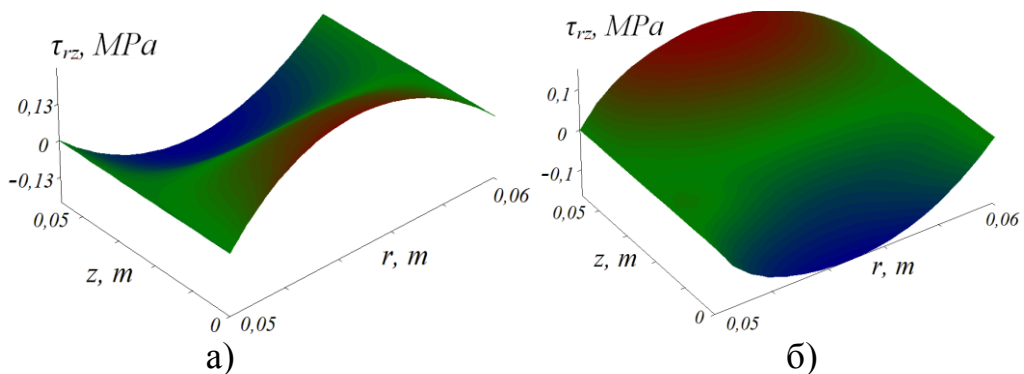


Рисунок 8 – Розподіл напружень поперечного зсуву:  
а) склопластик; б) вуглепластик

Аналіз теоретичних результатів при  $\Delta T = 100 \text{ K}$ , показаних на рис. 6-8, дозволяє відмітити наступне. Максимальні колові напруження в кільці зі склопластику в 10 разів менші, ніж в ущільненні з вуглепластику. Прослідковується зміна характеру розподілу осьових напружень та напружень

поперечного зсуву при заміні склопластику на вуглепластик, а також зменшення величини максимальних значень цих напружень приблизно на 30%.

Таким чином даний підхід розв'язання термопружної задачі для товстостінних багат шарових циліндричних оболонок дозволяє проводити дослідження їх напружено-деформованого стану при дії як статичного, так і теплового навантаження, коли враховується наближені до реальних умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових поверхнях.

**У четвертому розділі** розроблена експериментально-теоретична методика для визначення фізико-механічних характеристик склопластикових труб, проведена експериментальна перевірка достовірності теоретичних результатів й оцінки похибок, що вносять різного роду припущення в розрахунки на міцність тонкостінних елементів із міжшаровими дефектами. На основі методів математичної статистики визначені довірчі інтервали експериментально отриманих середніх значень модуля пружності й граничних напружень склопластику при розтяганні та стисканні.

У табл. 1 наведені фізико-механічні характеристики досліджуваних труб, які виробляються на ВАТ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» (м. Харків).

Таблиця 1 – Експериментально-теоретичні значення пружних сталих склопластиків

№ типо-розміру	Результати експерименту		Експериментально-теоретичні значення			
	$E_i^{\ominus}$ , МПа	S, %	$E_{ii}$ , МПа	$G_{ij}$ , МПа	$\nu_{ij}$	$\nu_{ji}$
1	$E_{\theta}^{\ominus} = 36050$	0,91	$E_z = 23800$	$G_{\theta z} = 7340$	$\nu_{z\theta} = 0,069$	$\nu_{\theta z} = 0,107$
			$E_{\theta} = 35500$	$G_{rz} = 4870$	$\nu_{zr} = 0,399$	$\nu_{rz} = 0,415$
2	$E_z^{\ominus} = 24100$	0,92	$E_r = 22900$	$G_{r\theta} = 6760$	$\nu_{\theta r} = 0,406$	$\nu_{r\theta} = 0,272$

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.

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

Для оцінки адекватності чисельно-аналітичного методу розв'язання термопружної задачі, описаного в попередньому розділі, були проведені випробування сталеної труби зміцненої склопластиковим бандажем при дії внутрішнього тиску.

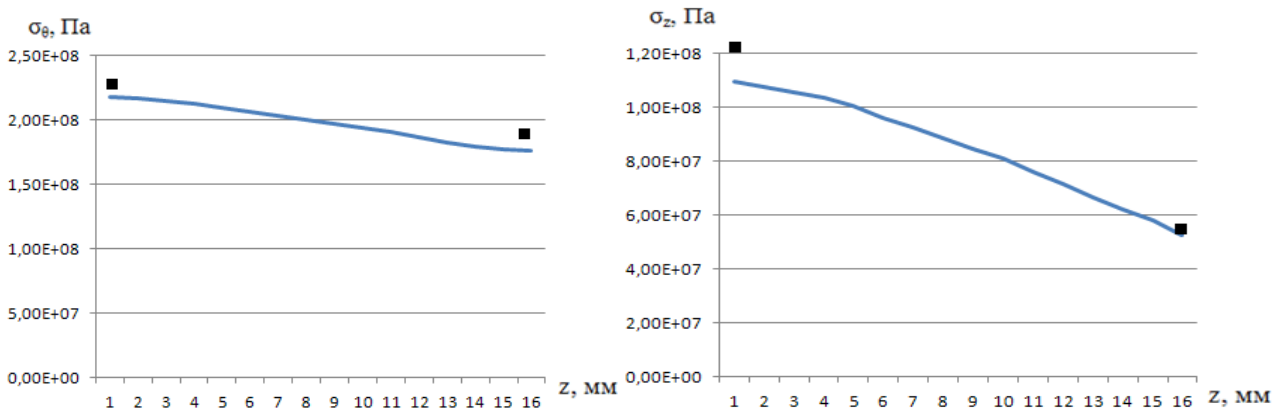


Рисунок 9 – Розподіл нормальних окружних та повздовжніх напружень на склопластиковому бандажі

Аналіз отриманих результатів (рис. 9) показує відмінність теоретичних і експериментальних результатів на 3-8%, що підтверджує адекватність обраної методики. Крапками показані експериментальні значення цих напружень.

У п'ятому розділі за допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності встановлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформованій стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань. Фланцеві з'єднання використовують для монтажу елементів склопластикових трубопроводів, а також для з'єднання склопластикових трубопроводів з металевими. Під час експериментальних досліджень граничного стану склопластикової труби на першому етапі руйнування склопластику було зафіксовано в зоні фланцевого з'єднання при внутрішньому гідростатичному тиску  $p_1^{*E} = 3,5 \text{ МПа}$ .

Як уже відмічалось, склопластикова труба – це багатошарова циліндрична оболонка діаметром 200 мм із товщиною стінки 4 мм і довжиною 1200 мм.

Технічні пружні сталі й граничні характеристики склопластику визначалися за методикою, наведеною в розділі 3. Фізико-механічні характеристики сталевому фланцю мали такі значення:  $E=210000 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,25$ . Як альтернатива сталевому фланцю розглядався фланець, виконаний із дюралюмінію В-95:  $E=70000 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,3$ .

Потрібно зазначити, що значення модуля пружності дюралюмінію втричі менше від величини модуля пружності сталі.

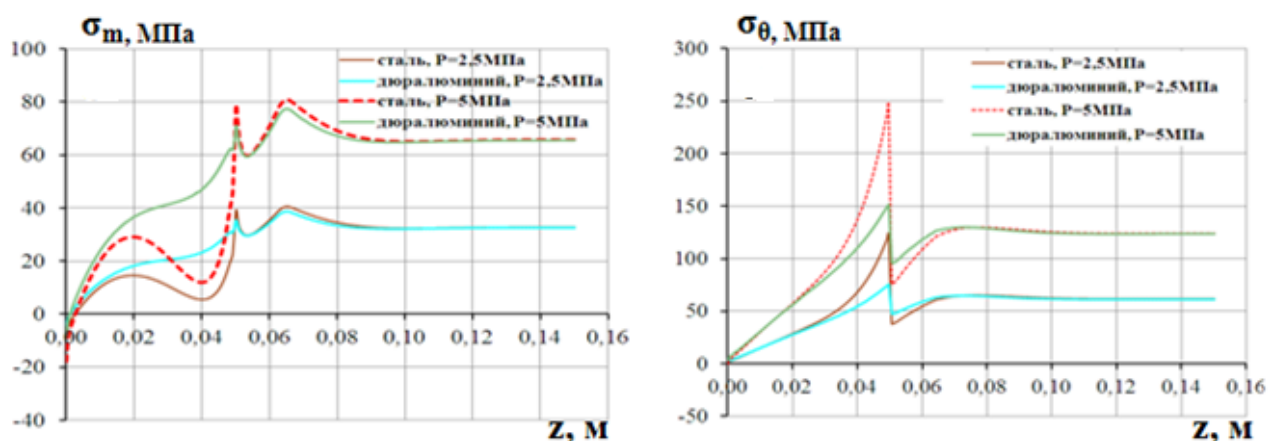


Рисунок 10 – Графіки зміни меридіональних  $\sigma_m$  і колових напружень  $\sigma_\theta$  вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання



Досліджувався напружений стан у точках внутрішньої, зовнішньої та контактної поверхонь труби при двох значеннях внутрішнього тиску –  $p=2,5$  МПа і  $p=5$  МПа. Аналіз результатів показує, що максимальні напруження виникають у точках контакту металевого фланця і склопластикової труби вздовж поверхні контакту (рис. 10-12). При цьому величини поперечних дотичних і трансверсальних напружень значно перевищують аналогічні напруження, що виникають на внутрішній і зовнішній поверхнях труби, під час дії одного і того самого навантаження.

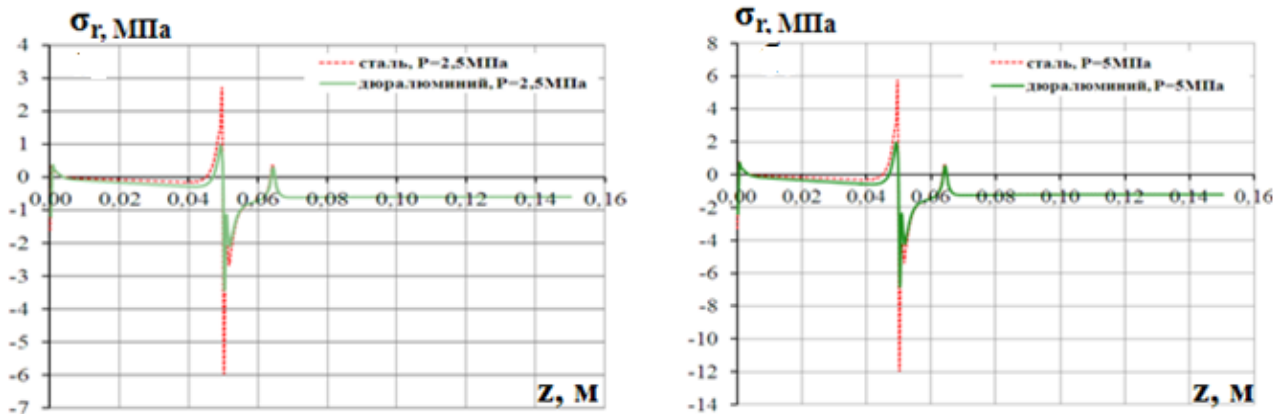


Рисунок 11 – Графіки зміни трансверсальних напружень  $\sigma_r$  вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання

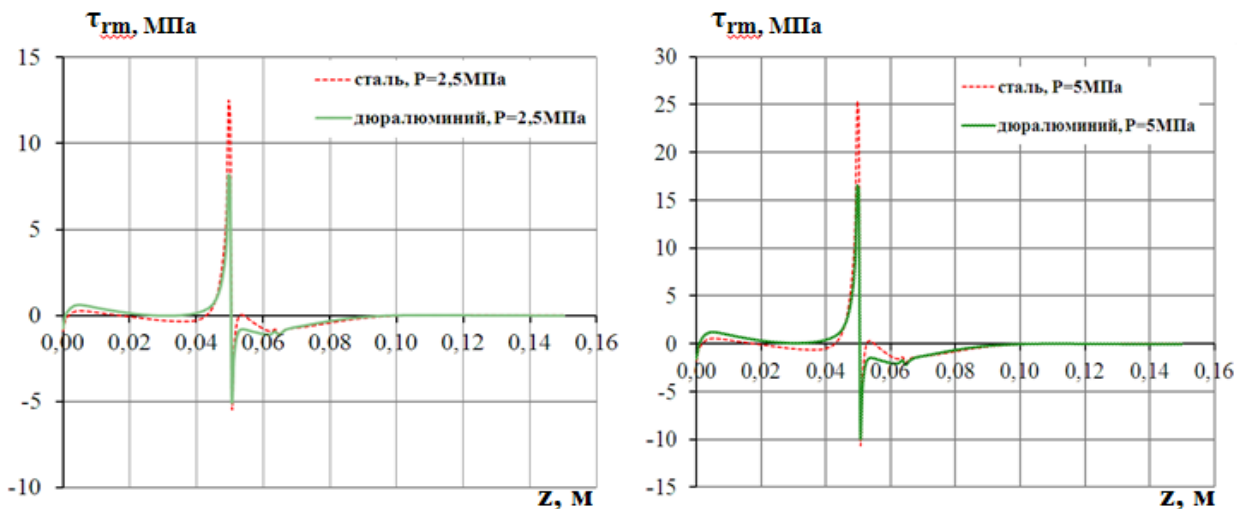


Рисунок 12 – Графіки зміни дотичних напружень  $\tau_{rm}$  вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання

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. Отримані теоретичні значення величин граничного тиску, при якому відбувається руйнування склопластикової труби в точках контакту її поверхні з металевими фланцями, за допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності, рівні: для сталевих фланців – 3,4МПа; для дюралюмінієвих фланців – 4,9МПа. Таким чином,

варіюючи жорсткістю фланців, можна досягти оптимальних умов роботи розглянутої конструкції склопластикової труби.

Розроблена методика оцінки несучої здатності багатошарових армованих елементів. На кожному кроці навантаження за допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності визначається зона неідеального контакту по сполучених лицьових поверхнях шару. Для цієї зони при подальшому розв'язанні задачі застосовують рівняння запропонованого варіанта дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок.

Вивчена несуча здатність торових балонів із композиційних матеріалів, що виготовляються методом намотування. Задача розв'язується на основі першої моделі дискретно-структурної теорії та прикладного методу розрахунків несучої здатності шаруватих тонкостінних елементів.

## 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. Проведено аналіз різних розрахункових моделей і методик розрахунку напружено-деформованого стану багатошарових елементів конструкцій з дефектами структури від дії статичних та температурних навантажень. Результатом аналізу став висновок, що в даний час проводиться активна робота по створенню ефективних методик розрахунку багатошарових конструкцій на основі дискретно-структурної теорії, коли враховується анізотропія термопружних властивостей матеріалу, схеми армування, особливості спільної роботи та умови контакту шарів, температурні навантаження. Актуальними також залишаються питання експериментальної перевірки різних моделей, які враховують дефекти структури композиційного матеріалу, вплив температури.

2. На основі дискретно-структурної теорії 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). 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 ефективний алгоритм визначення теплового коефіцієнта лінійного розширення для багатошарового анізотропного матеріалу. Відповідно до дискретно-

структурної моделі багатошарових оболонок і пластин розроблено методику визначення коефіцієнту проковзування сполучених поверхонь суміжних шарів, коли порушуються умови їх ідеального кінематичного контакту. Що дозволили на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла розробити чисельно-аналітичний підхід розв'язання термопружних незв'язних крайових задач для циліндричних товстостінних оболонок за умови як ідеального, так і неідеального контакту суміжних шарів по сполученим поверхням, який реалізовано на мові програмування VISUAL FORTRAN. Встановлено вплив температурних навантажень на напружено-деформований стан ущільнення робочого колеса, виготовленого із композиційних матеріалів.

4. Методом тензометрування досліджено деформований стан циліндричних оболонок зі склопластику з дефектами структури. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів доводять адекватність обраної розрахункової моделі.

5. 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. 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 дозволяють збільшити граничний тиск майже на 25%. Таким чином, варіюючи жорсткістю фланців, можна досягти оптимальних умов роботи розглянутої конструкції склопластикової труби.

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

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Дейнека А.В. Напряженно-деформированное состояние анизотропного криволинейного бруса при изгибе с учетом идеального и неидеального контакта между слоями / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, О.Н. Орел, А.Г. Хализева // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”. –2012. – № 4. – С. 74 – 87.

2. Дейнека А.В. Экспериментальные испытания механических свойств стеклопластикового цилиндра с межслойными дефектами структуры / С.М. Верещака, И.Т. Караш, Д.А. Жигилий, А.В. Дейнека // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – №3(29). – С. 32 – 34.

3. Дейнека А.В. Конструкционная прочность торообразных баллонов высокого давления / С.М. Верещака, Д. А. Жигилий, И.Т. Караш, А.В. Дейнека // Вісник СевНТУ. Серія “Механіка, енергетика, екологія”: збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 133. – С. 329 – 334.

4. Дейнека А.В. Напряженное состояние толстостенной трубы из стеклопластика при действии внутреннего давления и температурной нагрузки /

С.М. Верещака, А.В. Дейнека // Вісник СевНТУ. Серія “Механіка, енергетика, екологія”: збірник наукових праць – 2013. – Вип. 137. – С. 221 – 229.

5. Дейнека А.В. Термоупругое напряженное состояние многослойной трубы неоднородной структуры по толщине с учетом идеального контакта между слоями / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, Ю.В. Мороз, А.В. Шулумей // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 4. – С. 136 – 149.

6. Deineka A.V. Thermal stress state of impeller seal made from composite material / A.V. Deineka, S.M. Vereshchaka // Applied Mechanics and Materials. Vol. 630. – 2014. – р. 326-333. (обліковується базою даних SCOPUS).

7. Дейнека А.В. Термоупругое напряженное состояние многослойной трубы с защитным слоем из дюралюминия и углепластика / С.М. Верещака, А.В. Дейнека // Вісник НТУ «ХП»: Інформатика і моделювання. – 2014. – № 57. – С. 19 – 31.

8. Дейнека А.В. Напружено-деформований стан армованого плоского кривого бруса при згинанні з урахуванням ідеального контакту між шарами / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, О.В. Орел // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали II Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., 17-20 квітня 2012р. – Суми, 2012. – С. 125.

9. Дейнека А.В. Напружено-деформований стан армованого плоского кривого бруса при згинанні з урахуванням неідеального контакту між шарами / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, А.Г. Халізева // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали II Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., 17-20 квітня 2012р. – Суми, 2012. – С. 124.

10. Дейнека А.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 XXI століття: Матеріали міжнародної наук.-практ. конф. 15 – 19 вересня 2014 р. – Южне, 2014. – С.53.

11. Дейнека А.В. Термопружний напружений стан багат шарової труби з дефектами структури з різними умовами закріплення на торцях / С.М. Верещака, А.В. Дейнека // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2014. – С. 30.

## АНОТАЦІЯ

**Дейнека А.В. Конструкційна міцність багат шарових елементів машин з дефектами структури.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

У дисертаційній роботі вирішений ряд важливих науково-технічних завдань, які включають в себе обґрунтування моделей і методик розрахунку напружено-деформованого та термопружного стану багат шарових 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.

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.

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. Встановлено вплив температурних навантажень на напружено-деформований стан ущільнення робочого колеса, виготовленого із композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** багатошарові конструктивні елементи, конструкційна міцність, дискретно-структурна теорія, міжшарові дефекти структури матеріалу, термопружне деформування, ущільнення робочого колеса.

## АННОТАЦІЯ

**Дейнека А.В. Конструкционная прочность многослойных элементов машин с дефектами структуры. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Сумской государственной университет, Сумы, 2015.

В диссертационной работе решен ряд важных научно-технических задач, которые включают в себя обоснование моделей и методик расчета напряженно-деформированного и термоупругого состояния многослойных оболочек вращения с межслойными дефектами структуры. Разработанные алгоритмы, программы, методики исследований и полученные на их основе теоретико-экспериментальные результаты показали наличие новых особенностей деформированного состояния рассматриваемых конструкций.

Построено замкнутую систему дифференциальных уравнений и соответствующие краевые условия несвязанной стационарной задачи термоупругого деформирования многослойной композитной оболочки, позволяющие учесть деформации поперечного сдвига и трансверсального обжатия, обеспечить условия механического и теплового сопряжения слоев и условия термомеханической нагрузки на лицевых поверхностях такой оболочки.

На основе классической теории упругости анизотропного тела разработан численно-аналитический подход решения термоупругих несвязанных краевых задач для цилиндрических толстостенных оболочек при условии как идеального, так и неидеального контакта соседних слоев по сопряженным поверхностям. Установлено влияние температурных нагрузок на напряженно-деформированное состояние уплотнения рабочего колеса, изготовленного из композиционных материалов.

Решена задача прочности и получена величина граничного внутреннего давления комбинированных газовых баллонов высокого давления. Исследовано напряженно-деформированное состояние стеклопластиковых труб в зоне фланцевых соединений в зависимости от жесткости фланцев.

**Ключевые слова:** многослойные конструктивные элементы, конструкционная прочность, дискретно-структурная теория, межслойные дефекты структуры материала, термоупругое деформирование, уплотнение рабочего колеса.

## ABSTRACT

**Deineka A.V. Structural strength of machine elements multilayer structures with defects.** – Manuscript.

Ph.D. thesis in Engineering Science in specialty 05.02.09 - Dynamics and strength of machines. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis presents number of important scientific and technical problems, which include study models and methods of calculating the stress-strain and the thermoelastic state multilayer shells with interlayer structural defects. The algorithms, programs, research methodology, theoretical and experimental results showed the presence of new features deformed state considered structures.

We construct a closed system of differential equations and appropriate boundary conditions unrelated stationary problem thermostatic deformation of the multilayer composite shell that allow for deformations of transverse shear and transversal compression, ensure conditions of mechanical and thermal connection layers and thermomechanical loading conditions on the front surface of this shell.

Based on the classical theory of elasticity of an anisotropic body developed numerical-analytical approach solving of thermoelastic unrelated boundary problems for thick-walled cylindrical shells provided ideal and non-ideal contact of adjacent layers on surfaces mated. The influence of temperature loads on the stress-strain state seal rotor made from composite materials was found.

**Keywords:** multilayer structural elements, structural strength, discrete-structural theory, interlayer defects of the material structure, thermoelastic deformation, sealing the impeller.

Підписано до друку 19.05.2015 р.  
Формат 60x90/16. Ум. друк.арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим.  
Зам. №500.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК№3062 від 17.12.2007 р.