

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Високі питомі показники міцності й жорсткості волокнистих композиційних матеріалів поряд із хімічною стійкістю, порівняно малою вагою й іншими властивостями зробили ці матеріали привабливими для виготовлення трубопроводів різного призначення. Застосування склопластикових труб замість металевих збільшує термін служби трубопроводів у 5 – 8 разів, виключає застосування антикорозійних захисних засобів, у 4 – 8 разів знижує масу трубопроводу, виключає застосування зварювальних робіт.

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

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.

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

При виготовленні й експлуатації багатошарових конструкцій на міжшарових поверхнях контакту жорстких армованих шарів відбувається утворення тонкого м'якого клейового прошарку, а також різного роду структурних недосконалостей, наприклад ділянок непроклею або відшарувань.

Більшість робіт із розрахунків на міцність і граничний стан багатошарових конструкцій із дефектами структури типу непроклеїв і розшарувань виконане, як правило, у рамках наближених розрахункових схем. Через складність числової реалізації розглянутих задач отримані теоретичні результати потребують експериментальної перевірки, особливо якщо досліджується несуча здатність багатошарових тонкостінних елементів конструкцій з урахуванням різного роду початкових дефектів структури матеріалу.

У цьому зв'язку розроблення нових методик з розрахунку на міцність і граничний стан багатошарових конструкцій з дефектами структури на основі уточненої дискретно-структурної теорії, коли враховуються реальні умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових поверхнях контакту, визначає актуальність проведених досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проведені в дисертації дослідження тісно пов'язані з науковими програмами Сумського державного університету, які виконувалися в рамках держбюджетної тематики “Несуча здатність комбінованого газового балона високого тиску” (2010-2012 рр., держ. реєстрація № 0103U000768).

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні науково обґрунтованої методики розрахунків на міцність і несучу

здатність склопластикових труб і композитних газових балонів високого тиску з урахуванням впливу міжшарових дефектів структури матеріалу.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішені такі завдання:

- на основі дискретно-структурної теорії розроблена методика розв'язання геометрично нелінійних контактних задач для багатошарових циліндричних, сферичних і торових оболонок, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування);

- виготовлено експериментальне обладнання й досліджено деформований стан криволінійних брусів і циліндричних оболонок зі склопластику методом тензометрування;

- проведена експериментальна перевірка достовірності числових результатів, отриманих на основі двох розрахункових моделей багатошарових оболонок і пластин згідно з дискретно-структурною й структурно-безперервною теоріями;

- досліджений напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні фланцевих з'єднань залежно від жорсткості фланців;

- наданий розв'язок задачі міцності й отримана величина граничного внутрішнього тиску торових газових балонів.

Об'єкт дослідження – конструкційна міцність і несуча здатність оболонок обертання шаруватої структури.

Предмет дослідження – склопластикові труби, комбіновані й торові газові балони високого тиску, силова оболонка яких виконана з композиційного матеріалу шаруватої структури.

Методи дослідження. Для розв'язання геометрично нелінійної контактної задачі застосовані метод штрафних функцій, метод Фур'є, метод переміщень, метод ортогональної прогонки. На основі методу переміщень складені алгоритм і програма розрахунків на міцність багатошарових оболонок обертання складної форми. Для оцінки достовірності отриманих теоретичних і експериментальних даних використовується метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі ANSYS, також був поставлений і проведений фізичний експеримент.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

- отримані нові числові розв'язки геометрично нелінійної задачі деформації оболонок обертання шаруватої структури під дією внутрішнього тиску з неідеальним міжшаровим контактом, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану й контактного тиску в зоні локальних ділянок непроклею або розшарувань. Доведено, що напружений стан багатошарових елементів, визначений на основі дискретно-структурної теорії анізотропних оболонок, якісно відрізняється, а деформації – вище значень, знайдених згідно зі структурно-безперервною теорією;

- запропонована теоретико-експериментальна методика визначення фізико-механічних характеристик композитів шаруватої структури;

- уперше встановлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань;

– отримані нові розв’язки контактної задачі двох співвісних сферичних оболонок під час дії внутрішнього тиску, внутрішня оболонка виконана зі склопластику, а зовнішня з металевого сплаву;

– на основі методу переміщень розроблена методика розрахунків конструкційної міцності й несучої здатності армованих оболонок з міжшаровими дефектами структури матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичні й числові результати дисертаційної роботи впроваджені в наукових дослідженнях кафедри опору матеріалів і машинознавства Сумського державного університету, а також у прикладних науково-технічних розробках щодо вдосконалення виробів із композиційних матеріалів: ТОВ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» (м. Харків).

Запропоновані методики розрахунків багатошарових елементів конструкцій на міцність і несучу здатність використовуються в навчальному процесі Сумського державного університету.

Особистий внесок здобувача. Надані до захисту положення дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. У публікаціях, виданих у співавторстві, здобувачеві належать такі наукові результати:

[1 – 4, 8] – розроблена методика моделювання механічних властивостей багатошарового полого циліндра та виявлені особливості зміни напружень поперечного зсуву та контактного тиску по товщині оболонки в умовах складного навантаження;

[5, 6, 9] – змодельована розрахункова модель багатошарового бруса, коли припускається пружне прослизання сполучених поверхонь сусідніх шарів один відносно одного, доведено, що ця модель більш реально відображає картину деформації такого конструктивного елемента;

[7, 17] – складений алгоритм і розв’язана контактна задача двох співвісних сферичних оболонок під час дії внутрішнього тиску, внутрішня оболонка виконана зі склопластику, а зовнішня з металевого сплаву;

[10] – проведені розрахунки на конструкційну міцність та граничний стан торових армованих оболонок із міжшаровими дефектами структури матеріалу;

[11, 13] – виготовлене експериментальне обладнання та запропонована експериментально-теоретична методика визначення технічних сталих склопластикових труб;

[12] – експериментально встановлено вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з’єднання;

[14 – 16, 18] – на основі модифікованого поліноміального критерію міцності проведені розрахунки несучої здатності тонкостінних елементів шаруватої структури з неідеальним міжшаровою контактом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювалися на таких наукових конференціях, симпозіумах і семінарах: 16th and 17th International Scientific Conference “Economic for Ecology ISCD” (Суми, 2010 – 2011); Международной научно-технической конференции “Прогрессивная техника и технология” (Київ – Севастополь, 2011); Международной научно-технической конференции “Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических

систем и элементов их конструкций” (Севастополь, 2012); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників і студентів Сумського державного університету (Суми, 2010 – 2012).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 наукових робіт, із них 12 статей у фахових наукових журналах і збірниках України, 4 статті у зарубіжних виданнях та 2 – у збірниках праць науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел (219 найменувань на 24 сторінках), висновків і додатка (на 4 сторінках). Загальний обсяг дисертації становить 170 сторінок, включаючи 15 таблиць та 47 рисунків.

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 огляд та аналіз сучасного стану проблеми розрахунку склопластикових труб та композитних балонів високого тиску, коли враховується вплив міжшарових дефектів структури композиційних матеріалів на їх конструкційну міцність і несучу здатність.

Проведений аналіз конструкторсько-технічної документації з проектування, виготовлення й експлуатації склопластикових труб, балонів високого тиску, виконаних у формі багатшарових оболонок обертання, показав, що на основі сучасних методик розрахунків конструкцій з композиційних матеріалів у країнах СНД йде активна робота зі створення галузевих міждержавних і національних стандартів.

Проблема міцності шаруватих тонкостінних конструкцій з дефектами структури привертає останніми роками все більшу увагу дослідників унаслідок їхньої безумовної 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 багатошарових конструкцій.

Моделюванням контактної взаємодії у рамках дискретно-структурної теорії як за умови ідеального, так і неідеального контакту шарів займалися: А. Я. Александров, В. А. Баженов, В. В. Болотін, Л. Е. Брюкер, А. Т. Василенко, Е. І. Григолюк, Я. М. Григоренко, В. І. Гуляєв, В. 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 О. М. Гузя, В. В. Болотіна, Г. А. Ваніна, В. В. Васильєва, Г. П. Зайцева, В. В. Захарова, В. Н. Кобелєва, М. К. Кучера, О. К. Малмейстера, І. Ф. Образцова, Б. Л. Пелеха, Б. Є. Победрі, С. В. Серенсена, В. П. Тамужа, Ю. М. Тарнопольського, Г. О. Тетерса, Р. М. Крістенсена (R. M. Cristensen), Дж. Кларка (G. Clark) та інших авторів розроблені методи визначення ефективних характеристик шаруватих композитних систем, а також подане теоретичне й експериментальне обґрунтування застосування різних критеріїв міцності при розрахунках анізотропних елементів шаруватої структури з міжшаровими дефектами на несучу здатність.

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 проведених досліджень.

У другому розділі структуровані й узагальнені рівняння дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок і пластин із дефектами структури

матеріалу по товщині. За допомогою отриманих рівнянь рівноваги, геометричних і фізичних співвідношень враховуються геометрична нелінійність деформацій, деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення.

Багатошарова оболонка складається з n тонких анізотропних шарів (рис. 1). 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 $S_z^{(k)}$.

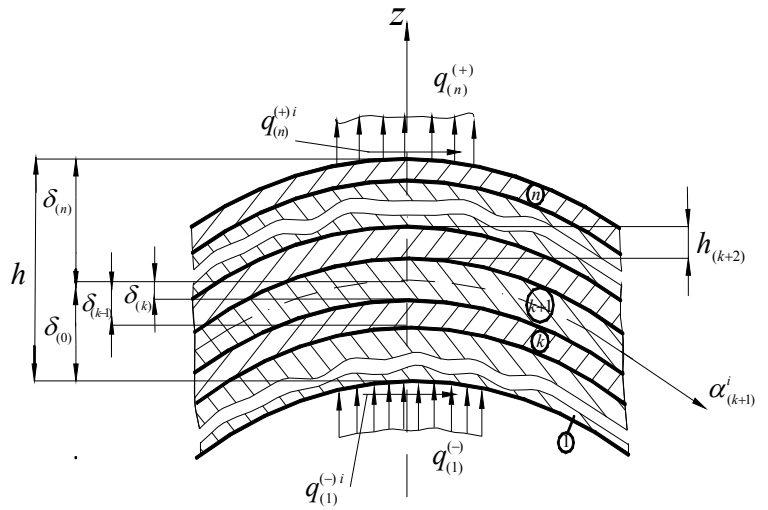


Рисунок 1 - Структура багатошарового композита

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 набирають 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. Для оболонок обертання, які містять n шарів зі співвісними поверхнями, отримана система з $n \times 14$ диференціальних рівнянь у частинних похідних. Згідно з наведеним варіантом дискретно-структурної теорії розроблено дві розрахункові моделі, які містять неідеальні ділянки контакту сполучених поверхонь анізотропних шарів.

Унаслідок того, що між жорсткими шарами в процесі вироблення 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.

Суть другого варіанта розрахункової моделі багат шарової анізотропної оболонки полягає в тому, що розглянута оболонка складається з n жорстких анізотропних шарів товщиною $h^{(k)}$, ($k=1,2,\dots,n$) і між сполученими жорсткими шарами спостерігається клейовий прошарок ненульової товщини $h^{[k]}$, ($k=1,2,\dots,n-1$). Переміщення точок клейового прошарку лінійно

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

Також у змішаній формі отримана розв'язувальна нелінійна система рівнянь безперервно-структурної теорії анізотропних оболонок (третя модель), яка містить 14 диференціальних рівнянь у частинних похідних. Кусково-неоднорідна по товщині шарувата оболонка розглядається як квазіоднорідна зі зведеними пружними характеристиками. При цьому виконується припущення про ідеальний контакт суміжних жорстких шарів.

У третьому розділі на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла досліджується напружено-деформований стан багатошарового плоского криволінійного бруса. Для оцінки впливу статичних і кінематичних умов контакту по сполучених лицьових поверхнях сусідніх шарів, що володіють циліндричною анізотропією, складена система алгебраїчних рівнянь. Порядок системи рівнянь визначається кількістю сполучених шарів. В основу розрахунків розглянутого багатошарового криволінійного бруса покладений дискретний підхід. Система розв'язувальних рівнянь побудована для всього пакета шарів з урахуванням як ідеального, так і неідеального контакту сполучених поверхонь сусідніх шарів.

У разі, коли композит є набором n по-різному орієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, запропонована методика визначення зведених пружних 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.

Як приклад розглянутий напружено-деформований стан плоского криволінійного бруса при згинанні. Вважалось, що брус складається із трьох односпрямованих шарів ($N = 3$). Геометричні параметри бруса: розміри поперечного перерізу – $h = 48$ мм, $t = 4$ мм; радіуси внутрішньої й зовнішньої поверхонь бруса – $a = 100$ мм, $b = 104$ мм.

між шарами плоского кривого бруса при певних значеннях зовнішнього навантаження через руйнування клейового прошарку можливе виникнення пружного прослизання двох сусідніх шарів один щодо одного. При цьому між різницею переміщень у коловому напрямку $u_0^{(i)}(a_i, \theta)$, $u_0^{(i+1)}(a_i, \theta)$ сполучених поверхонь сусідніх шарів і дотичними напруженнями $\tau_{r\theta}^{(i)}(a_i, \theta)$ існує залежність

$$u_0^{(i)}(a_i, \theta) - u_0^{(i+1)}(a_i, \theta) = K^{(i)} \tau_{r\theta}^{(i)}. \quad (7)$$

Як граничні з рівняння (7) виходить два варіанти: при $1/K^{(i)} = 0$ спостерігається ідеальне прослизання, при $K^{(i)} = 0$ – ідеальний контакт. Вважаючи, що радіальні напруження $\sigma_r^{(i)}(a_i, \theta)$ і переміщення $u_r^{(i)}(a_i, \theta)$ при переході через поверхню розділу шарів стрибка не мають, статичні й кінематичні умови неідеального контакту мають вигляд

$$\sigma_r^{P(i)}(a_i, \theta) = \sigma_r^{P(i+1)}(a_i, \theta), \quad (8)$$

$$u_r^{P(i)}(a_i, \theta) = u_r^{P(i+1)}(a_i, \theta), \quad (9)$$

$$u_\theta^{P(i)}(a_i, \theta) - u_\theta^{P(i+1)}(a_i, \theta) = K^{(i)} \tau_{r\theta}^{P(i)}. \quad (10)$$

Наведені результати (рис. 2, 3) отримані під час дії зосередженої розтягальної сили $P = 100$ Н. За допомогою штрихпунктирної лінії подані графіки напружень і переміщень, отримані згідно зі структурно-безперервною теорією. Суцільними лініями показані результати, які відповідають дискретно-структурній теорії багат шарового бруса з урахуванням як ідеального, так і неідеального контакту сполучених лицьових поверхонь сусідніх шарів. Значення коефіцієнтів K_i ($i=1, 2$) для розглянутого тришарового бруса вважаються однаковими, тобто $K_1 = K_2 = K$.

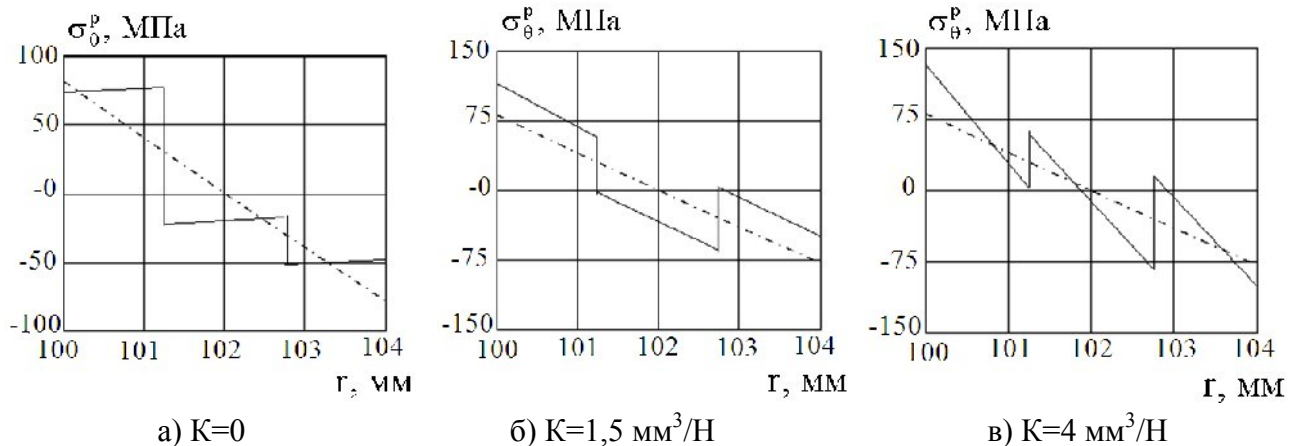


Рисунок 2 - Графіки зміни тангенціальних напружень σ_θ^P по товщині бруса в перерізі з координатою $\theta = \pi/2$

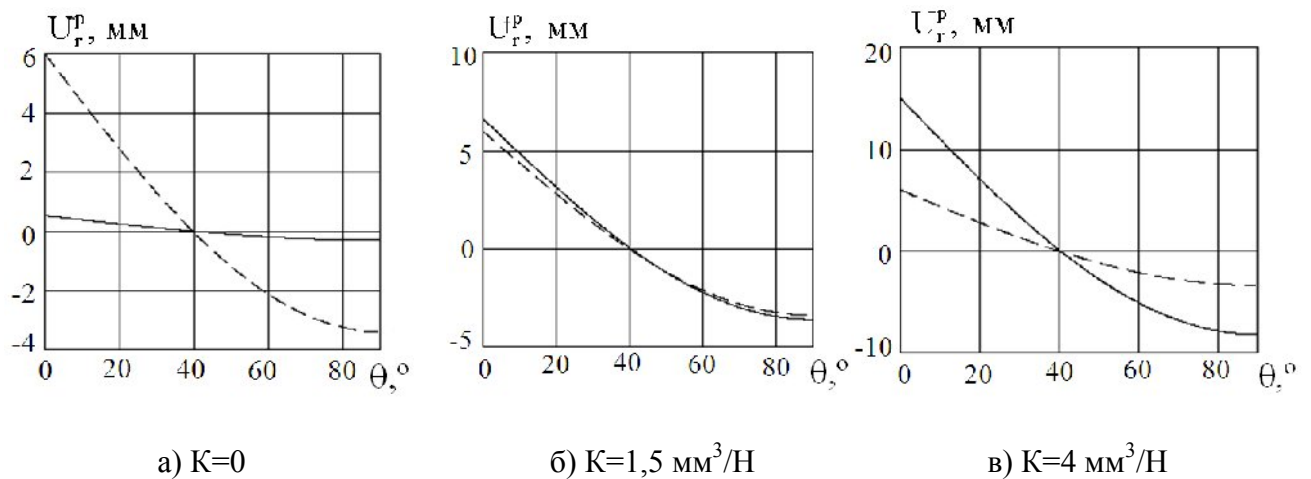


Рисунок 3 - Графіки зміни радіальних переміщень u_r^P по зовнішньому контуру бруса

Криволінійний брус має симетричну структуру армування щодо серединної поверхні. При цьому всі три шари мають приблизно однакові фізико-механічні характеристики. Перший і третій шари з кодом $[0^\circ_4 / -75^\circ]$ і $[-75^\circ / 0^\circ_4]$ мають такі параметри: $E_\theta^{(1)} = E_\theta^{(3)} = 35500 \text{ МПа}$, $E_r^{(1)} = E_r^{(3)} = 23800 \text{ МПа}$, $E_z^{(1)} = E_z^{(3)} = 22900 \text{ МПа}$, $\nu_{\theta r}^{(1)} = \nu_{\theta r}^{(3)} = 0,402$, $\beta^{(1)} = \beta^{(3)} = 2,63$, $k^{(1)} = k^{(3)} = 1,22$; другий шар із кодом $[0^\circ_2 / -75^\circ / 75^\circ / 0^\circ_2]$ – $E_\theta^{(2)} = 33600 \text{ МПа}$, $E_r^{(2)} = 23900 \text{ МПа}$, $E_z^{(2)} = 24800 \text{ МПа}$, $\nu_{\theta r}^{(2)} = 0,403$, $\beta^{(2)} = 2,59$, $k^{(2)} = 1,17$.

Аналіз теоретичних результатів, наведених на рис. 2, 3, дозволяє відзначити таке. При урахуванні ідеального контакту між шарами (рис. 2 а) розподіл напружень σ_θ^P істотно відрізняється від результатів, отриманих за класичною анізотропною теорією. Так, наприклад, тангенціальні напруження стискання на зовнішній поверхні бруса відповідно до теорії з урахуванням ідеального контакту шарів дорівнюють $\sigma_\theta^P = -48,6 \text{ МПа}$, що в 1,5 раза менше відповідних напружень, отриманих за класичною теорією.

Як виходить з рис. 2 б і 3 б, урахування неідеального контакту дозволяє одержати реальну картину напружено-деформованого стану бруса під час дії зосередженої сили. Так, напруження й деформації, отримані як за дискретно-структурною, так і за структурно-безперервною теорією, практично збігаються при $K=1,5 \text{ мм}^3/\text{Н}$. При збільшенні коефіцієнта $K=4 \text{ мм}^3/\text{Н}$ (рис. 2 в, 3 в) спостерігається істотне зростання тангенціальних напружень σ_θ^P (на внутрішній поверхні бруса σ_θ^P з урахуванням неідеального контакту між шарами в 1,8 раза більше, ніж σ_θ^P за класичною анізотропною теорією) і радіальних переміщень u_r^P , які вдвічі перевищують значення, отримані за класичною теорією. Урахування тільки кінематичних (рис. 3 а) умов ідеального контакту між шарами істотно знижує радіальні переміщення u_r^P порівняно з результатами класичної теорії.

Крім того, проведені дослідження показали, що із усіх варіантів армування бруса найефективнішим є варіант із симетричною структурою армування шарів щодо серединної поверхні, тому що при несиметричному армуванні один із шарів практично не несе навантаження. За допомогою цієї методики розрахунків, знаючи, що шари змінюють модуль пружності, можна фіксувати момент руйнування шарів і одержати картину напружено-деформованого стану бруса для нових параметрів його навантаження.

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.

Конструкція для випробування кільцевих зразків на розтягання наведена на рис. 4.

Створена експериментальна установка для проведення випробувань криволінійних брусків зі склопластику на згинання внаслідок дії протилежно спрямованих зосереджених поперечних сил P , прикладених до його торців. Загальний вигляд установки показано на рис. 5. Вона містить розривну машину Р-0,5, два металеві пристосування для захоплення торців бруса, два індикатори годинникового типу з точністю до 0,01 мм для вимірювання радіальних переміщень і тензометричну систему.

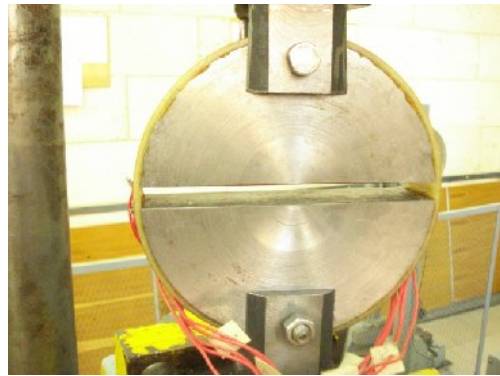


Рисунок 4 - Конструкція для випробування кільцевих зразків на розтягання



Рисунок 5 - Конструкція для випробування криволінійних брусків зі склопластику на згинання

У табл. 1 і 2 наведені фізико-механічні й граничні характеристики досліджуваних труб, які виробляються на ВАТ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» (м. Харків).

Таблиця 1 - Експериментально-теоретичні значення пружних сталих склопластиків

Номер типорозміру	Результати експерименту		Експериментально-теоретичні значення			
	E_i^E , МПа	S, %	E_{ij} , МПа	G_{ij} , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}
1	$E_\theta^E = 36050$	0,91	$E_z = 23800$ $E_\theta = 35500$	$G_{\theta z} = 7340$ $G_{rz} = 4870$	$\nu_{z\theta} = 0,069$ $\nu_{zr} = 0,399$	$\nu_{\theta z} = 0,107$ $\nu_{rz} = 0,415$
2	$E_z^E = 24100$	0,92	$E_r = 22900$	$G_{r\theta} = 6760$	$\nu_{\theta r} = 0,406$	$\nu_{r\theta} = 0,272$

Таблиця 2 - Граничні напруження склопластикових труб

σ_{θ}^+ , МПа	σ_z^+ , МПа	σ_r^+ , МПа	σ_{θ}^- , МПа	σ_z^- , МПа	σ_r^- , МПа	$\sigma_{zr}^- = \sigma_{zr}^+ =$ $= \sigma_{\theta r}^- = \sigma_{\theta r}^+$, МПа	$\sigma_{\theta z}^- = \sigma_{\theta z}^+$, МПа
410	240	16	360	190	90	30	50

Для оцінки достовірності результатів, отриманих на основі запропонованої експериментально-теоретичної методики, додатково були проведені гідростатичні випробування склопластикових труб. Загальний вигляд гідростенда й схема наклеювання тензорезисторів на склопластикову трубу показані на рис. 6. 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 розрахунках тонкостінних армованих елементів конструкцій навіть на початковій стадії навантаження призводить до значних похибок.

У п'ятому розділі наведені нові результати розв'язання крайових задач дискретно-структурної теорії шаруватих оболонок обертання із міжшаровими дефектами структури, подана методика та проведені розрахунки на міцність і несучу здатність склопластикових труб та торових балонів.

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. Показано схему лінеаризації розв'язувальних нелінійних диференціальних рівнянь на основі ітераційного методу Ньютона-Канторовича.

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



Рисунок 6 - Загальний вигляд установки для проведення гідростатичних випробувань

$$\frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{A_{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} = F \left(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \bar{Y}^{(k)}, \frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{B_{(k)} \partial \alpha_2^{(k)}} \right), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

де $\bar{Y}^{(k)} = \{Y_1^{(k)}, Y_2^{(k)}, \dots, Y_{14}^{(k)}\}^T = \{\Phi_{11}^{(k)}, \Phi_{12}^{(k)}, R_{13}^{(k)}, M_{11}^{(k)}, M_{12}^{(k)}, L_{11}^{(k)}, L_{12}^{(k)}, u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, w^{(k)}, \gamma_1^{(k)}, \gamma_2^{(k)}, \Psi_1^{(k)}, \Psi_2^{(k)}\}^T$ – вектор розв'язків.

Розв'язок крайової задачі отриманий за допомогою методу ортогональної прогонки, 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.

Для оцінки напруженого стану багатошарових оболонок обертання складної форми за допомогою методу переміщень побудована матриця жорсткості, що встановлює залежність між крайовими зусиллями на торцях s-го тонкостінного елемента оболонки обертання та крайовими переміщеннями цих торців. При цьому замість граничних умов виконуються умови зв'язку з пов'язаними з даним елементом частинами конструкції. Розроблений алгоритм, згідно з яким рівняння рівноваги складаються для кожного вузлового елемента, а потім відбувається їх компонування в систему лінійних алгебраїчних рівнянь щодо узагальнених переміщень вузлів оболонки шаруватої структури. На основі запропонованих розрахункових моделей, а також розглянутих раніше алгоритмів розрахунків такого класу завдань мовою програмування ФОРТРАН створений пакет прикладних програм.

Як об'єкт дослідження обраний комбінований газовий балон. Комбінований балон тиску містить внутрішню захисну поліетиленову оболонку, що несе циліндричну склопластикову оболонку. Несуча склопластикові оболонка із зовнішнього боку захищена металеву обшивкою, яка складається із кругової циліндричної оболонки та сферичних днищ, що контактують зі сферичними днищами несучої склопластикової оболонки.

Аналіз напруженого стану балона в області сферичних днищ, отриманого з урахуванням контактної взаємодії оболонок із різномодульного матеріалу, дозволяє зробити висновок, що внутрішня склопластикові оболонка (модуль пружності склопластику в три рази нижчий від модуля пружності дюралюмінію) практично передає більшу частину навантаження на жорсткішу зовнішню металеву оболонку. Можливий контактний тиск між шарами визначався коефіцієнтом зниження жорсткості обтиснення й різницею нормальних переміщень суміжних шарів. Величина зони контакту уточнювалася за допомогою методу простих ітерацій.

Установлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань. Фланцеві з'єднання використовуються

для монтажу елементів склопластикових трубопроводів, а також для з'єднання склопластикових трубопроводів з металевими трубопроводами або металевою арматурою.

Під час експериментальних досліджень граничного стану склопластикової труби на першому етапі руйнування склопластику було зафіксовано при внутрішньому гідростатичному тиску $p_1^{*E} = 3,5 \text{ МПа}$ в зоні фланцевого з'єднання. Геометричні розміри фланця, виготовленого зі сталі, показані на рис. 7. Переріз труби в поздовжньому напрямку наведений на рис. 8.

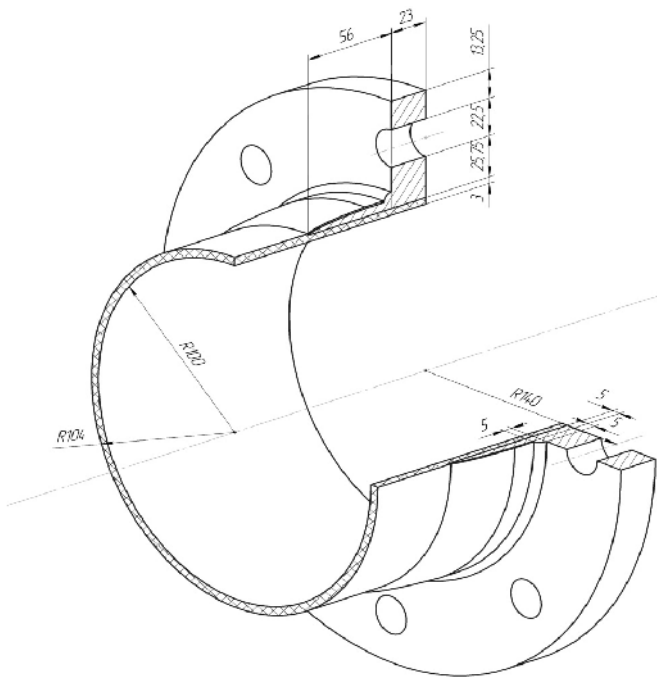


Рисунок 7 - Геометричні розміри фланця

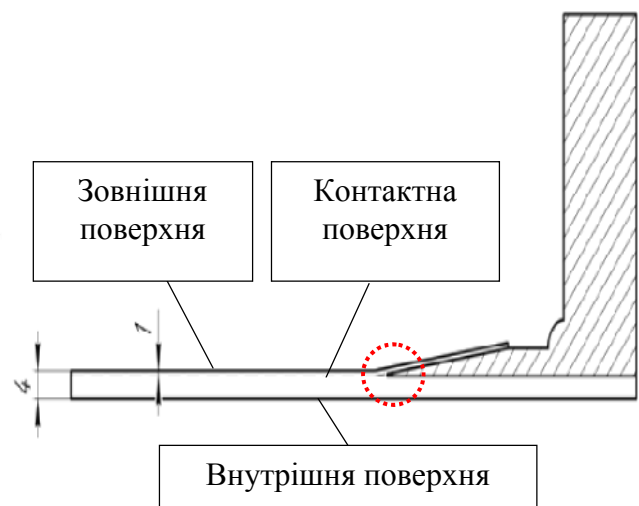


Рисунок 8 - Поздовжній переріз частини труби в зоні фланця

Як уже відмічалось, склопластикові труби – це багат шарова циліндрична оболонка діаметром 200 мм із товщиною стінки 4 мм і довжиною 1200 мм. Технічні пружні сталі й граничні характеристики склопластику наведені в табл. 1 і 2 відповідно. Фізико-механічні характеристики сталевих фланців 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.

Досліджувався напружений стан у точках внутрішньої, зовнішньої та контактної поверхонь труби (рис. 8) при двох значеннях внутрішнього тиску – $p = 2,5 \text{ МПа}$ і $p = 5 \text{ МПа}$. Аналіз результатів показує, що максимальні напруження виникають у точках контакту металевих фланців і склопластикової труби вздовж поверхні контакту (рис. 9–11). 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.

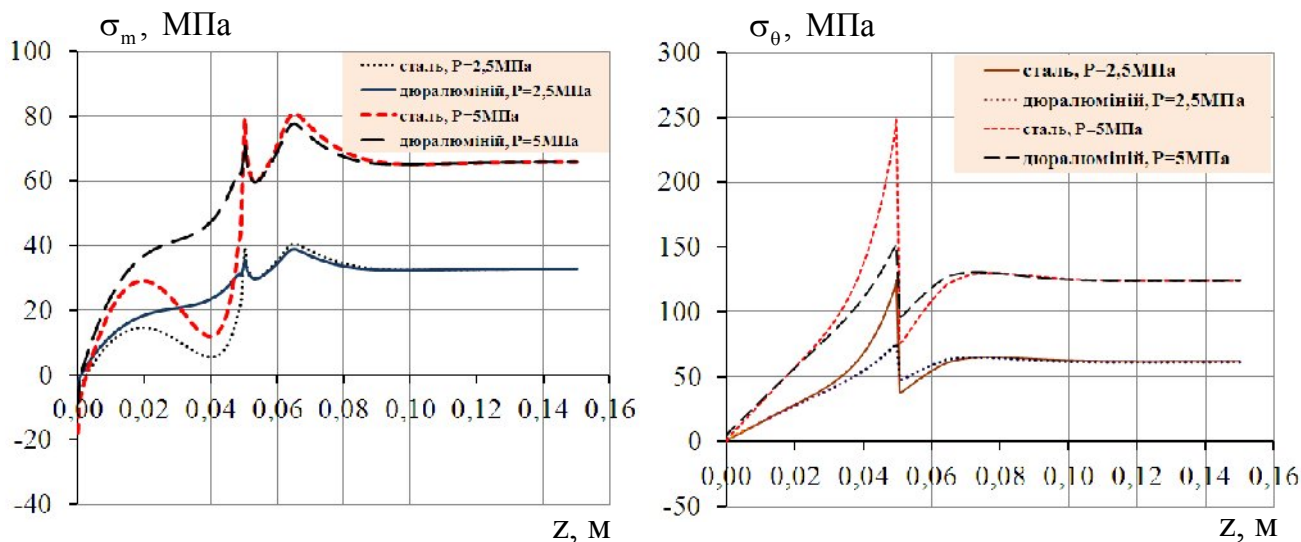


Рисунок 9 - Графіки зміни меридіональних σ_m і колових напружень σ_θ вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання

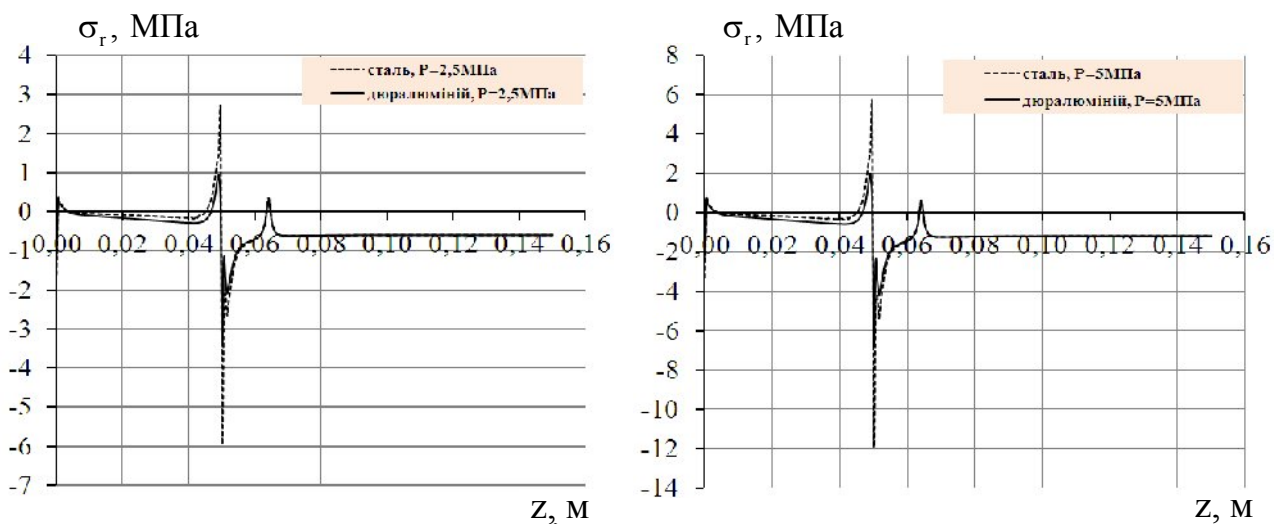


Рисунок 10 - Графіки зміни трансверсальних напружень σ_r вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання

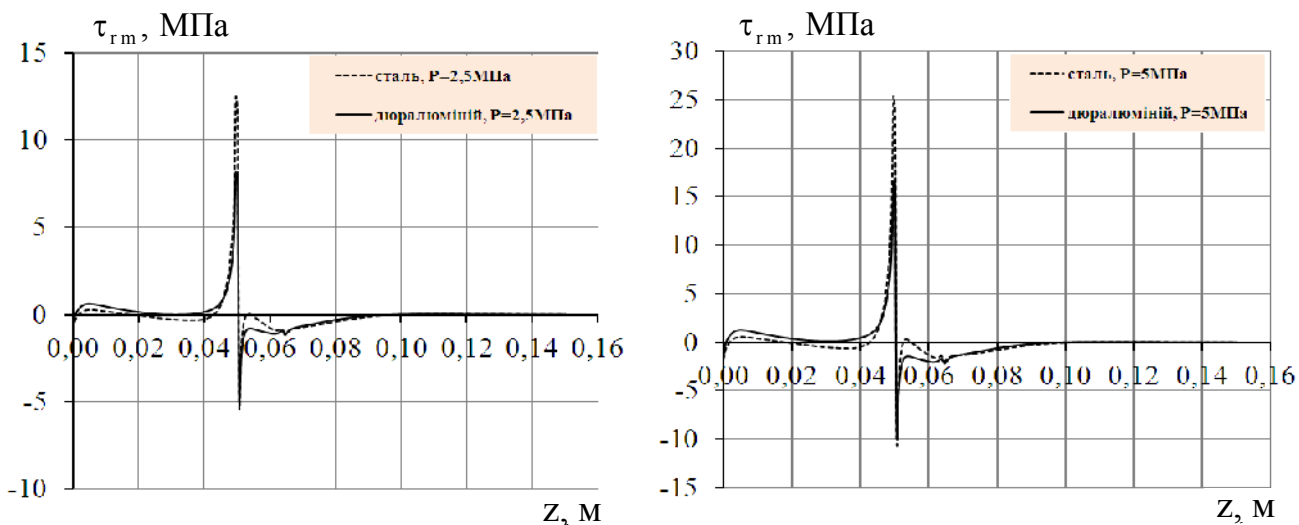


Рисунок 11 - Графіки зміни дотичних напружень τ_{rm} вздовж контактної поверхні труби в зоні фланцевого з'єднання

Порівнюючи значення дотичних і трансверсальних напружень, які виникають у точках контакту сталевих і дюралюмінієвих фланців зі склопластиковою оболонкою, можна зазначити, що ці напруження відрізняються одне від одного майже в 1,5 раза. Так, наприклад, при $z = 0,05$ м і $p = 2,5$ МПа поперечні дотичні напруження дорівнюють: для сталевих фланців – $\tau_{rm} = 12,39$ МПа; для дюралюмінієвих фланців – $\tau_{rm} = 8,19$ МПа.

Для визначення теоретичного значення граничного тиску, при якому відбувається руйнування склопластикової труби в точках поверхні її контакту з металевими фланцями, використовувався модифікований поліноміальний критерій міцності. Модифікований поліноміальний критерій міцності для тонкостінних елементів із шаруватих композитів із міжшаровими дефектами структури матеріалу містить граничні характеристики шару на поперечний зсув і трансверсальне стискання (розтягання). Отримані теоретичні значення величин граничного тиску дорівнюють: для сталевих фланців – $p_{IC}^{*T} = 3,4$ МПа; для дюралюмінієвих фланців – $p_{ID}^{*T} = 4,9$ МПа.

Таким чином, варіюючи жорсткість фланців, можна досягти оптимальних умов роботи розглянутої конструкції склопластикової труби.

Значна відмінність граничних характеристик жорстких і проміжних міжфазних шарів обумовлює вибір тієї або іншої моделі дискретно-структурної теорії пластин і оболонок. Тому розшарування тут розглядається не як окремий вид руйнування, а як фактор, що визначає вид дискретно-структурної моделі багатошарової конструкції з неідеальним контактом між сполученими шарами.

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 містять обґрунтування моделей і методів розрахунків на міцність і несучу здатність багатошарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури. Розроблені алгоритми, програми, методики досліджень і отримані на їх основі теоретично-експериментальні результати показали наявність нових особливостей під час розв'язання розглянутих задач.

1. Побудована розрахункова модель деформування багатошарових оболонок обертання з неідеальним контактом сполучених поверхонь сусідніх армованих

шарів (зони непроклеїв, розшарувань, прослизання); припускається, що коли умови безперервності переміщень і напружень (ідеального контакту) при переході від одного сусіднього армованого шару до іншого не виконуються, спостерігається пружне прослизання по контактних поверхнях.

2. Отримані нові числові розв'язки геометрично лінійної та нелінійної задач деформації тонкостінних елементів шаруватої структури під час дії статичного навантаження з неідеальним міжшаровим контактом, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану й контактної тиску в зоні локальних ділянок непроклею або розшарувань. Показано, що напружений стан багатошарових елементів, визначений на основі дискретно-структурної теорії анізотропних оболонок, якісно відрізняється, а деформації – вище значень, знайдених згідно зі структурно-безперервною теорією.

3. Розроблена й апробована експериментально-теоретична методика оцінки достовірності основних положень і результатів роботи; доведено, що вже на початковій стадії навантаження, особливо при деформаціях поздовжньо поперечного згинання, структурно-безперервна модель оболонок шаруватої структури неадекватно відображає роботу таких конструкцій через їх низьку жорсткість деформаціям поперечного зсуву та обтиснення. Запропонований ефективний алгоритм визначення інтегральних фізико-механічних характеристик склопластикових труб.

4. Наведений розв'язок задачі однобічного контакту двох суміжних шарів оболонки, який може виникати в зоні ділянок непроклею або розшарувань. Контактний тиск між шарами визначається коефіцієнтом зниження жорсткості обтиснення і різницею нормальних переміщень суміжних шарів. Отримані числові результати доводять, що при збільшенні зазначеного коефіцієнта зона контакту між шарами зменшується з одночасним збільшенням контактної тиску на поверхні контакту. Встановлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань.

5. На основі модифікованого поліноміального критерію міцності для тонкостінних елементів із шаруватих композитів із міжшаровими дефектами структури матеріалу, який містить граничні характеристики шару на поперечний зсув і трансверсальне обтиснення (відрив), розроблена методика оцінки несучої здатності багатошарових армованих елементів.

6. Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження результатів дисертації під час розрахунків конструкцій із композиційних матеріалів для хімічного машинобудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Караш И. Т. Анализ напряжённого состояния многослойного полого цилиндра при действии внутреннего давления / С. М. Верещака, И. Т. Караш // Вісник Сумського державного університету. Серія “Технічні науки”. – 2010. – № 3. – С. 7–19.

2. Караш И. Т. Прочность многослойного полого цилиндра с дефектами структуры / С. М. Верещака, И. Т. Караш // Вісник Сумського державного університету. Серія “Технічні науки”. – 2011. – № 1. – С. 70 – 83.

3. Karash E. T. Analysis stress state of multilayer hollow cylinder under axial forces and bending moments / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВАБУ. – 2011. – Вип. 64. – С. 127 – 137.

4. Karash E. T. Stress state of multilayered hollow cylinder under internal and external pressure. / S. M. Vershchaka, R. A. AL-Allaf, E. T. Karash // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 3(25). – С.40 -44.

5. Karash E. T. Delamination stresses in thin-wall structures of composite materials / S. M. Vershchaka, R. A. AL-Allaf, E. T. Karash // Праці Одеського політехнічного університету: науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса. – 2012. – Вип. 1(38). – С. 24 – 30.

6. Karash E. T. Bunde stress theory of semicircular layered composite curved bars / S. M. Vershchaka, R. A. AL-Allaf, E. T. Karash // Праці Одеського політехнічного університету: науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса. – 2011. – Вип. 2(36). – С. 19 – 27.

7. Караш И. Т. Моделирование одностороннего контакта металлической и стеклопластиковой оболочек / С. М. Верещака, А. В. Стрелец, И. Т. Караш // Вісник СевНТУ. Серія “Механіка, енергетика, екологія”: збірник наукових праць. – Севастополь. – 2011. – Вип. 120. – С. 304 – 305.

8. Karash E. T. Stress state analysis of multi-layered hollow cylinder under bending moment / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // Вісник СНАУ. Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”. – Суми. – 2011. – Вип. 8(23). – С. 104 – 109.

9. Караш И. Т. Напряженно-деформированное состояние многослойного плоского кривого бруса при изгибе с учетом идеального и неидеального контакта между слоями / С. М. Верещака, И. Т. Караш // Вісник Сумського державного університету. Серія “Технічні науки”. – 2011. – №4. – С. 105 – 120.

10. Караш И. Т. 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. – Севастополь. – 2012. – Вип. 133. – С. 329 – 334.

11. Karash E. T. Experimental study of thin-walled structural fiberglass elements / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – №2(28). – С.25 – 29.

12. Караш И. Т. Исследование 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.

13. Karash E. T. Experimental model of the semicircular laminated composite curved bars / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // International Journal of Structronics & Mechatronics. – 2012. – Volume 1. – Issue 1. – P. 67 – 73.

14. Karash E. T. Effect of Change Angle the Template used in Tests of Composite Materials on the Value of Modulus of Elasticity / S. M. Vershchaka, D.A.

Zhigiliy, E. T. Karash // International Journal of Science and Engineering Investigations.– May 2012. – Volume 1. – Issue 4. – ISSN: 2251 – 8843. – P. 19 – 23.

15. Karash E. T. Modeling of multi-layer composite material pipes under internal pressure / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // International Journal of Structronics & Mechatronics. – 2012. – Volume 1. – Issue 2. – P. 1 – 12.

16. Karash E. T. The experimental model of the pipe of a composite material under the effect of internal pressure / S. M. Vershchaka, D. A. Zhigiliy, E. T. Karash // International Journal of Science and Engineering Investigations. – June 2012. – Volume 1. – Issue 5. – ISSN: 2251 – 8843. – P. 1 – 4.

17. Karash E. T. Modeling of Unilateral Contact of Metal and Fiberglass Shells / E. T. Karash // International conference Applied Mechanics and Manufacturing Technology (AMMT 2011). – August 4 – 7. – 2011. – Bali, Indonesia, Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vol. 87. – P. 206 – 208.

18. Karash E. T. Evaluation of load carrying ability of multilayer cylindrical shell / S. M. Vershchaka, E. T. Karash // International conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro composite structures. Politecnico di Torino. Department of Mechanical and Aerospace Engineering . – June 18 – 20. – 2012. – Italy. – P.10.

АНОТАЦІЯ

Імад Тома Бане Караш. Конструкційна міцність склопластикових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.02.09 – динаміка і міцність машин. – Сумський державний університет, Суми 2012.

У дисертаційній роботі вирішений ряд важливих науково-технічних завдань, які містять обґрунтування моделей і методів розрахунків на міцність і несучу здатність багат шарових оболонок обертання з міжшаровими дефектами структури. Розроблені алгоритми, програми, методики досліджень і отримані на їх основі теоретично-експериментальні результати показали наявність нових особливостей під час розв'язання розглянутих задач.

Отримані нові числові розв'язки геометрично лінійної та нелінійної задач деформації тонкостінних елементів шаруватої структури під час дії статичного навантаження з неідеальним міжшаровим контактом, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану й контактної тиску в зоні локальних ділянок непростежуваних або розшарувань. Показано, що напружений стан багат шарових елементів, визначений на основі дискретно-структурної теорії анізотропних оболонок, якісно відрізняється, а деформації – вище значень, знайдених згідно зі структурно-безперервною теорією.

Наведений розв'язок задачі однобічного контакту двох суміжних шарів оболонки, який може виникати в зоні ділянок непростежуваних або розшарувань. Установлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань.

Ключові слова: конструкційна міцність, склопластикові труби, дискретно-структурна теорія, міжшарові дефекти структури матеріалу.

АННОТАЦИЯ

Имад Тома Бане Караш. Конструкционная прочность стеклопластиковых оболочек вращения с межслойными дефектами структуры.– Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Сумский государственный университет, Сумы 2012.

В диссертационной работе решен ряд важных научно-технических задач, которые содержат в себе обоснование моделей и методов расчетов на прочность и несущую способность многослойных оболочек вращения с межслойными дефектами структуры. Разработанные алгоритмы, программы, методики исследований и полученные на их основе теоретико-экспериментальные результаты показали наличие новых особенностей во время решения рассмотренных задач.

Даны новые численные решения геометрически линейной и нелинейной задач о деформации многослойных тонкостенных элементов с неидеальным контактом между слоями при статическом нагружении. Выявлены основные закономерности изменения напряженного состояния и контактного давления в зоне локальных участков непрочности или расслоений. Показано, что напряженное состояние многослойных элементов, определенное на основе дискретно-структурной теории анизотропных оболочек, качественно отличается, а деформации – выше значений, найденных согласно структурно-непрерывной теории.

Решена задача одностороннего контакта двух сопряженных слоев оболочки, который может возникать в зоне участков непрочности или расслоений. Установлено влияние жесткости фланцев на напряженно-деформированное состояние стеклопластиковых труб в зоне их соединений.

Ключевые слова: конструкционная прочность, стеклопластиковые трубы, дискретно-структурная теория, межслойные дефекты структуры материала.

SUMMARY

Emad Toma Bane Karash. The structural strength of fiberglass rotational shells with interlayer structural defects. – Manuscript.

The thesis for obtainment of the Candidate's degree of Technical Sciences in speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – Sumy State University, Sumy, 2012.

The thesis presents the solution of a number of important scientific and engineering tasks, containing validation of the models and calculation methods for strength and loading capacity of multilayer shells with interlayer structural defects. In the work there were developed the algorithms, programs, research methods and theoretical and experimental results, obtained on their basis, showed the presence of the new peculiarities in the solution of the set tasks.

The new numerical solutions were proposed for geometrically linear and nonlinear problem of deformation of multilayer thin-walled elements with imperfect contact between layers under static loading. There were revealed the basic laws of change of the stress state and contact pressure in the area of local areas of non-adherences or delamination. It is shown that the stress state of multilayer elements, defined on the basis of discrete-structural theory of anisotropic shells, is qualitatively different, and strains have higher values than those obtained according to the structural and continuous theory.

There was solved the task of unilateral contact between two conjugate layers of the shell, which may occur in the areas of non-adherences or delamination. The influence of the stiffness of the flanges on the stress-strain state of fiberglass pipes in the area of their junction was determined.

Keywords: structural strength, fiberglass pipes, discrete-structural theory, interlayer defects of the material structure.

Підписано до друку 05.11.2012. Формат 60×90/16. Папір ксероксний.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Гарнітура Times New Roman Сур.
Ум. друк. арк 1,1. Замовлення №1362. Друк. офс.

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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Імад Тома Бане Караш



УДК 539.3

**КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ СКЛОПЛАСТИКОВИХ ОБОЛОНОК
ОБЕРТАННЯ З МІЖШАРОВИМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРИ**

05.02.09 – динаміка і міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, доцент
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
ГАДЯКА Володимир Григорович,
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО ім. М. В.Фрунзе»,
начальник відділу газодинаміки,
динаміки та міцності машин СКБ, м. Суми.

Захист відбудеться « 14 » грудня 2012 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова 2.

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

Автореферат розісланий « 14 » листопада 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К55.051.03



Є. М. Савченко

