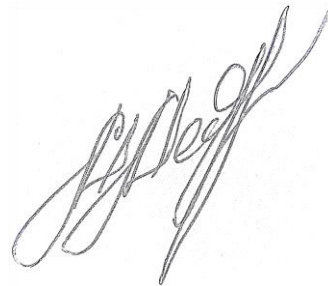


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА

МЕДНІКОВА МАРГАРИТА АНАТОЛІЇВНА



УДК 539.3

**ВПЛИВ КРУГОВИХ ОТВОРІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ
СТАН ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК СКІНЧЕНОЇ ДОВЖИНИ ПРИ
КРУЧЕННІ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Колодяжний Анатолій Павлович,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пенсіонер

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
Гудрамович Вадим Сергійович,
Інститут технічної механіки НАН України і
Державного космічного агентства України,
завідувач відділу міцності та надійності механічних систем

доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України
Грищак Віктор Захарович,
Запорізький національний університет Міністерства освіти і
науки України,
завідувач кафедри прикладної математики і механіки

Захист відбудеться «12» березня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.051.10 при Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара за адресою: м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 35, корпус 3, ауд. 25.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці ім. Олеся Гончара Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Казакова, 8.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: 49010, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 72, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, вченому секретарю спеціалізованої вченої ради Д 08.051.10.

Автореферат розіслано «29» січня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, доцент



А. Ю. Дреус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тонкостінні оболонки знаходять широке застосування в конструкціях ракетно-космічної галузі і в авіабудуванні, де високі вимоги до вагової ефективності повинні поєднуватися з достатньою несучою здатністю. Привабливість оболонок, що мають кругову циліндричну форму і властивість кругової симетрії, при дії на них навантажень, які не порушують вказаного рівня симетричності або антисиметричності, полягає в тому, що напруження в основному є мембранними, окрім, можливо, вузьких крайових зон. Саме мембранний характер напружень дозволяє ефективно використати тонкостінні циліндричні оболонки в якості несучих елементів. Зміни в конструкції оболонки або в навантаженні, при дії яких виникає значна неоднорідність полів мембранних напружень або деформацій вигину, можуть викликати різке зниження характеристик міцності і несучої здатності оболонки.

Досить часто, з конструктивних та технологічних міркувань, в оболонках створюються отвори, біля яких при різних видах навантаження виникають зони різкого локального збільшення напружень, що можуть ставати причиною руйнування конструкції. Мірою такого зростання напруження служить коефіцієнт концентрації напружень, який показує в скільки разів найбільше напруження в зоні концентрації перевищує референсне значення. В якості референсних приймаються напруження в аналогічній оболонці без отвору при тому ж навантаженні.

Зазвичай оболонки розглядаються при дії на них стандартних видів навантажень: осьового стиску, розтягу, зовнішнього і внутрішнього тиску, кручення і вигину, серед яких кручення вивчене у меншому обсязі. Кручення є поширеним видом навантаження, наприклад: в процесі польоту ракети в результаті виникнення сил, що створюються органами управління, окрім вигинаючих моментів і осьових навантажень може виникати крутний момент; при автомобільному транспортуванні ракети на ложементях за допомогою довгомірного транспортного засобу; при маневруванні літаку; у магістральних газопроводах, нафтопроводах і водопроводах, в яких застосовуються довгі оболонки, та ін.

З точки зору розрахунку визначення напружено-деформованого стану в оболонці з отвором як в лінійному наближенні так і при врахуванні нелінійності деформацій представляє собою досить складну крайову задачу, оскільки при її формулюванні необхідно враховувати двозв'язні області інтегрування.

Найбільше поширення в застосуванні до вирішення задачі про визначення напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок, ослаблених круговим отвором, отримала лінійна математична модель, запропонована А. І. Лур'є, в якій розв'язок будується для малих отворів. Основним обмежувальним припущенням моделі є те, що збурений напружений стан, який вноситься отвором, має локальний характер і швидко згасає при віддаленні від отвору, а поблизу краю оболонки напружений стан є однорідний.

Робота А. І. Лур'є поклала початок ряду досліджень в цьому напрямку, проведених вченими з України, США, Нідерландів, Німеччини та ін. Автори розширювали межі застосування вказаної моделі шляхом збільшення розміру отворів, їх кількості та розглядом різних їх форм.

Для правильної оцінки міцності оболонок з отворами розв'язок задачі про визначення напруженого стану потребує врахування геометричної нелінійності деформування особливо для великих отворів. Найбільш ефективним методом розв'язання такого класу задач є метод скінченних елементів, який вільний від обмежень, що стосуються розмірів оболонки, форми і величини отвору, реалізації складних граничних умов та особливостей навантаження. Слід зазначити, що дослідження несучої здатності силових оболонкових систем аерокосмічної техніки з отворами при крученні із застосуванням сучасних чисельних алгоритмів є недостатньо вивченою проблемою.

Перелічені вище обставини послужили обґрунтуванням актуальності наукового дослідження впливу кругових отворів на напружено-деформований стан тонких оболонок скінченних довжин при дії кручення за допомогою методу скінченних елементів, зокрема лінійного і геометрично нелінійного аналізів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано в рамках науково-дослідницької роботи на Державному підприємстві «Конструкторське Бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Проведені в роботі дослідження пов'язані з держбюджетною науково-дослідною темою Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара «Теоретико-експериментальні методи і алгоритми визначення несучої здатності неоднорідних структур із пошкодженнями» (№ ДР 0115U002386, 2017 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення впливу кругових отворів на напружено-деформований стан ізотропних пружних тонкостінних циліндричних оболонок скінченної довжини при крученні. Для досягнення мети сформульовано наступні завдання:

1 Розробка ефективного підходу до вирішення задачі про визначення напружено-деформованого стану циліндричних оболонок скінченної довжини, ослаблених круговим отвором, який полягає в створенні ефективних скінченно-елементних моделей та формулюванні критеріїв і процедур оцінки достовірності результатів.

2 Дослідження впливу змінення довжини оболонки і розміру отвору на напружено-деформований стан і коефіцієнт концентрації напружень при крученні на основі методу скінченних елементів, зокрема лінійного та геометрично нелінійного аналізів.

3 Визначення межі області застосовності моделі А. І. Лур'є в задачі про визначення напружено-деформованого стану в оболонках скінченних довжин, ослаблених круговим отвором у широкому діапазоні його розмірів.

4 Дослідження впливу величини навантаження на напружено-деформований стан і коефіцієнт концентрації напружень в оболонках скінченних довжин з круговими отворами при крученні використовуючи геометрично нелінійний аналіз методу скінченних елементів.

5 Порівняння розв'язків, отриманих методом скінченних елементів у лінійній і геометрично нелінійній постановках, з метою визначення умов застосовності лінійного аналізу.

6 Проведення параметричного аналізу напружено-деформованого стану оболонок скінченних довжин, ослаблених круговим отвором при крученні для

отримання нових даних про закономірності розвитку напружень і переміщень по усій поверхні оболонки, зокрема поблизу отвору у процесі навантаження.

Об'єктом дослідження є ізотропна пружна циліндрична тонка оболонка скінченної довжини, ослаблена круговим отвором.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан оболонок, ослаблених круговим отвором при дії кручення.

Методи дослідження. Для проведення дослідження напружено-деформованого стану оболонок використовується метод скінченних елементів, зокрема лінійний і геометрично нелінійний статичні аналізи.

Наукова новизна результатів полягає в наступному:

1 Уперше виконано параметричний порівняльний лінійний і геометрично нелінійний аналіз напружено-деформованого стану оболонок скінченної довжини, ослаблених круговим отвором при дії кручення. Встановлено, що процедура лінійного аналізу методу скінченних елементів застосовна тільки на початковому етапі навантаження і для оболонок з малими отворами.

2 Уперше визначено межі області застосування ширококовживаної лінійної моделі А. І. Лур'є, яка ґрунтується на припущенні про швидке згасання поля збурюючих напружень, викликаного появою отвору, стосовно до оболонок скінченних довжин. Показано, що таке припущення стає невірним для оболонок достатньо широкого діапазону скінченних довжин. Зазначена модель може використовуватися для визначення рівня концентрації напружень до оболонок великої довжини з малим розміром отворів.

3 Виявлено ефекти впливу країв оболонок скінченної довжини і отвору на напружений стан і коефіцієнт концентрації напружень. Залежно від розміру отвору існує певна довжина оболонки, при зменшенні якої починає позначатися підтримуючий вплив краю, що виражається в істотному зниженні рівня концентрації напружень. Отримано, що вкорочення оболонки приводить до зниження коефіцієнта концентрації напружень.

4 Уперше встановлена наявність істотного впливу геометричної нелінійності деформації на напружено-деформований стан і коефіцієнт концентрації напружень у процесі навантаження. На відміну від лінійного розв'язку, при урахуванні нелінійності деформацій поля напружень та переміщень зазнають якісної зміни не лише біля отвору, а й по усій поверхні оболонки. Поля збурюючих напружень, які виникають біля отвору на початковому етапі навантаження, зі зростом навантаження досягають країв оболонки. Коефіцієнт концентрації напружень із зростанням крутного моменту може збільшуватися на десятки відсотків.

Достовірність і обґрунтування отриманих в дисертаційній роботі результатів ґрунтується на законах механіки деформівного твердого тіла, забезпечена коректним формулюванням поставленої задачі та зіставленням отриманих в дисертації результатів чисельних розв'язків з загальновідомими аналітичними і експериментальними даними.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1 Розроблено рекомендації щодо вибору ефективної скінченно-елементної сітки в задачах про визначення напружено-деформованого стану оболонок, ослаблених круговим отвором.

2 Запропоновано алгоритм оцінки і контролю точності розв'язку, заснований на властивості лінійної задачі, яка полягає у тому, що при фіксованому значенні параметра кривизни коефіцієнт концентрації напружень є постійним для оболонок великих довжин.

3 Отримано залежності коефіцієнта концентрації напружень від довжини оболонок для широкого діапазону розмірів отвору та їх товщини на основі лінійного аналізу методом скінченних елементів, які грають роль довідкових даних у знаходженні конкретного значення коефіцієнта концентрації напружень при заданих геометричних розмірах оболонки, та оцінки впливу зміни окремих геометричних розмірів на його величину.

4 Показано, що для правильної оцінки міцності, при розрахунку потрібно враховувати геометричну нелінійність деформації.

5 Представлені картини полів напружень і компонентних полів переміщень залежно від геометричних параметрів оболонки й від рівня навантаження несуть інформаційний характер та є корисними в використанні на практиці для проектування нових систем.

6 Отримані закономірності розвитку напружень і переміщень біля отвору, а також дані про залежності коефіцієнта концентрації напружень у процесі навантаження, можуть використовуватися для розробки раціонального підкріплення вирізу, призначеного для зниження рівня концентрації напружень.

7 Знайдений ефект зниження рівня концентрації напружень із зменшенням довжини оболонки може застосовуватися при проектуванні несучої конструкції, що дозволить знижувати вагу несучих конструкцій.

8 Отримані результати є базовими для дослідження реальних конструкцій з урахуванням пружнопластичних властивостей матеріалу, характеру анізотропії і впливу підкріплюючих силових елементів отвору на напружений стан.

Результати дослідження впроваджені у практиці державного підприємства «Конструкторське Бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля при проектуванні ракети космічного призначення, зокрема адаптеру та головного обтічника в рамках роботи за міжнародним контрактом за темою «АКРК-2».

Публікації та особистий внесок здобувача. Основні результати дослідження опубліковано в 13 наукових роботах, з них 2 статті [1 – 2] у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (Index Copernicus, SCOPUS) (з них 1 [2] виконано без співавторів), 3 статті [3 – 5] у фахових виданнях України, 8 [6 – 13] – праці в матеріалах наукових конференцій та збірниках тез доповідей.

Наукові роботи [1, 3 – 13] виконані у співавторстві з науковим керівником к.т.н. Колодяжним А. П. У спільних публікаціях за темою дисертації особистий внесок автора включає розробку скінченно-елементних моделей [1, 3 – 13], реалізацію чисельного дослідження [1, 3 – 13], побудова алгоритму розв'язання геометрично нелінійних задач [1, 3, 4, 6 – 9, 11 – 13], обробку отриманих результатів [1, 3 – 13], обґрунтування отриманих результатів шляхом дослідження їх збіжності с результатами інших авторів [10].

Аналіз отриманих даних, формулювання висновків та підготовка матеріалів публікацій проводилися спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на XIX міжнародній науково-практичній конференції «Людина і Космос» (Дніпро, 2017 р.); I міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (Харків, 2018 р.); міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки і математики» (Львів, 2018 р.); IV, VI міжнародних науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2017 р., 2019 р.); VI, VII міжнародних конференціях «Космічні технології: сьогодення і майбутнє» (Дніпро, 2017 р., 2019 р.); VII міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Запоріжжя, 2019 р.); II міжнародній науково-технічній конференції пам'яті академіка В. І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» (Дніпро, 2019 р.).

Дисертація в цілому розглядалася на науково-технічній раді Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 149 сторінок. Основна частина викладена на 92 сторінках, містить 56 рисунки, 5 таблиць, список використаних джерел з 115 найменувань на 14 сторінках. Додатки займають 17 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтована актуальність теми дослідження, представлений зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета та завдання, перелічені методи дослідження, наведені наукова новизна та практичне значення результатів, обґрунтована достовірність отриманих результатів, подано інформацію про апробацію результатів, публікації та особистий внесок здобувача, а також представлено структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі «Аналітичний огляд сучасного стану проблеми напружено-деформованого стану оболонок з отворами» виконано огляд робіт, присвячених теоретичному та експериментальному дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) в оболонках з отвором. У висновку до розділу сформульована постановка завдань дисертаційного дослідження.

Коло питань, пов'язаних з дослідженням напруженого стану та несучої здатності оболонок, ослаблених отвором, розглянуто в роботах А. Я. Александрова, М. Х. Ахметзянова, Ю. А. Ашмаріна, Е. Л. Гарт, Е. І. Григолюка, О. Я. Григоренка, Я. М. Григоренка, В. З. Грищака, В. С. Гудрамовича, О. М. Гузя, В. І. Гуляєва, А. П. Дзюби, Д. В. Клименка, А. П. Колодяжного, О. С. Космодам'янського, Р. М. Кушніра, В. І. Моссаковського, І. М. Пирогова, І. М. Преображенського, А. К. Приварникова, Є. Ф. Прокопало, А. С. Ракіна, Г. М. Савіна, Є. А. Сторожука, Л. А. Фільштинського, І. А. Цурпала, І. С. Чернишенка, Вал. М. Чехова, Вік. М. Чехова, Ю. А. Шевлякова, В. П. Шевченка, К. І. Шнеренка, V. Dyke, J. G. Lekkerkerker, J. N. Starns, R. C. Tennison, D. Withum та ін.

Уперше метод визначення напруженого стану та коефіцієнта концентрації напружень для пружної кругової циліндричної оболонки з малим отвором в лінійній

постановці запропонований А. І. Лур'є в 1946 р. Для формулювання задачі інтегрування в двозв'язній області припускається розділення напруженого стану на основне, що відповідає суцільній оболонці і збурене, що вноситься отвором. Вважається, що збурене поле напружень має локальний характер. Математично таке припущення формулюється як рівність збурюючих напружень нулю на нескінченності.

А. І. Лур'є отримав асимптотичні формули коефіцієнта концентрації напружень k_t , який визначається як відношення величини максимальних напружень в зоні їх концентрації σ_{\max} до референсних напружень σ_0 , тобто напружень у суцільній оболонці без отвору, напружений стан якої при тому ж навантаженні вважається основним:

$$k_t = \sigma_{\max}/\sigma_0. \quad (1)$$

У разі чистого кручення в якості референсних напружень приймаються дотичні напруження τ_0 в поперечних перерізах суцільної оболонки без отворів, які визначаються співвідношенням:

$$\tau_0 = M_k/2\pi R^2 h. \quad (2)$$

де M_k , R , h – крутний момент, радіус і товщина оболонки відповідно.

У такій постановці, коефіцієнт концентрації напружень не залежить від рівня навантаження і від довжини оболонки та визначається єдиним параметром β , що має назву в публікаціях параметра кривизни, який включає в себе товщину h , радіус оболонки R і радіус отвору r :

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{2} \cdot \frac{r}{\sqrt{Rh}}. \quad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Переважає більшість відомих розв'язків задачі про визначення НДС тонкостінних оболонок, ослаблених круговим отвором засновані на вказаній моделі. Крім того, поширеними в використанні є чисельні методи: скінченнорізницький, граничних елементів та метод скінченних елементів (МСЕ), серед яких МСЕ є найбільш ефективним методом розв'язання даної задачі. Він є вільним від обмежень, що стосуються розмірів оболонки, форми і величини отвору, реалізації складних граничних умов, особливостей навантаження та дозволяє врахувати геометричну нелінійність деформування при вирішенні задачі.

В основному в роботах досліджуються оболонки під дією осьового стиску, розтягу, внутрішнього та зовнішнього тиску. В порівнянні із зазначеними видами навантаження, задача визначення НДС оболонок при крученні вивчена в меншому обсязі. Зазвичай визначається величина напружень у зоні їх концентрації, при цьому залишається відкритим питання про вплив граничних умов оболонки скінченної довжини на напружений стан та на величину коефіцієнта концентрації напружень.

Кількість робіт, присвячених дослідженню впливу геометричної нелінійності на НДС і k_t в оболонках є обмеженою, це питання потребує більш ґрунтовного опрацювання.

Проведений аналітичний огляд сучасного стану проблеми дозволив сформулювати мету та завдання дослідження.

У другому розділі «Алгоритм методу скінченних елементів вирішення задачі визначення напружено-деформованого стану оболонок з отворами» викладені основи алгоритму МСЕ, дано опис методів, використаних в роботі для вирішення поставлених завдань і описані застосовані типи скінченних елементів.

В роботі використовується МСЕ в формі методу переміщень, реалізований в програмному комплексі NASTRAN. Для відзнайдення поля переміщень формулювання МСЕ пов'язане з пошуком мінімуму потенційної енергії системи серед можливих переміщень заданої форми. Для виконання умов рівноваги необхідно продиференціювати повну потенційну енергію по переміщеннях (U) і прирівняти нулю. Підсумовування виразу мінімізації повної потенційної енергії за скінченними елементами приводить до лінійної системи алгебраїчних рівнянь:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (4)$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості;

$\{F\}$ – глобальний вектор-стовпець сил.

Для вирішення задачі в геометрично нелінійній постановці використовуються метод Ньютона – Рафсона і метод продовження по параметру довжини дуги.

При врахуванні геометричної нелінійності складається система нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[K_{el} + K_{\sigma}]\{U\} = \{F\}, \quad (5)$$

де $[K_{el}]$ – матриця жорсткості елементів, отримана через жорсткість матеріалу;

$[K_{\sigma}]$ – диференціальна матриця жорсткості (залежить від напружень) або матриця початкових напружень (в нелінійному ітераційному процесі початкові напруження присутні з другого приросту).

Матриця жорсткості елементів складається з двох – лінійної $[K_0]$ і нелінійної $[K_{NL}]$, які відповідають лінійній і нелінійній поведінці матеріалу:

$$[K_{el}] = [K_0] + [K_{NL}], \quad (6)$$

$$[K_{NL}] = \int_V ([B_0]^T [D] [B_{NL}] + [B_L]^T [D] [B_{NL}] + [B_{NL}]^T [D] [B_0]) dV. \quad (7)$$

Сума матриць жорсткості елементів і диференціальної матриці називається тангенціальною матрицею жорсткості $[K_{\tau}]$:

$$[K_{\tau}] = [K_0] + [K_{NL}] + [K_{\sigma}]. \quad (8)$$

При проведенні дисертаційного дослідження розроблено 46 остаточних скінченно-елементних (СЕ)-сіток. Для кожної з величин отворів та довжин оболонок створена індивідуальна СЕ-сітка. Щоб досягти задовільних результатів для кожної із СЕ-моделей, у залежності від кількості скінченних елементів в сітці, регулювався набір параметрів нелінійного ітераційного розв'язку.

У третьому розділі «Лінійний аналіз напружено-деформованого стану оболонок з отворами» представлені результати дослідження напружено-деформованого стану і коефіцієнта концентрації напружень в тонких оболонках різних довжин, ослаблених круговим отвором різного розміру при дії кручення з використанням лінійного МСЕ-аналізу.

Використання МСЕ-розв'язку для лінійної задачі дає можливість порівнювати і аналізувати застосовність моделі А. І. Лур'є до оболонок скінченних довжин у широкому діапазоні розмірів отворів.

Дослідження на основі лінійного МСЕ-аналізу виконано з метою:

- розробки ефективних СЕ-сіток;
- формулювання критеріїв точності і процедур оцінки достовірності результатів;
- дослідження впливу зміни довжини оболонки і розміру отвору на НДС і коефіцієнт концентрації напружень;
- дослідження межі області застосовності моделі А. І. Лур'є в задачі про визначення НДС оболонок скінченних довжин, ослаблених отвором у широкому діапазоні його розмірів.

У підрозділі 3.1 «Постановка задачі» дано опис об'єктів дослідження.

Досліджуються пружні ізотропні тонкі циліндричні оболонки, ослаблені круговим отвором, в діапазоні параметру довжин L/R від 0,2 до 20,7, розмірів отворів r/R від 0,053 до 1,00 і товщин R/h від 100 до 974, з фіксованим радіусом оболонки R .

У вертикальному положенні нижній торець жорстко закріплений і нерухомий. В якості елемента, жорстко скріпленого з верхнім торцем оболонки, використовується імітатор жорсткої круглої пластини нульової товщини, у центрі якого прикладається крутний момент M_k . Верхній торець оболонки може зміщуватися і повертатися вільно, зберігаючи при цьому кругову форму. Кромка отвору вільна від навантажень і від обмежень у переміщеннях. Вплив інших видів граничних умов на НДС оболонок не досліджувався.

У підрозділі 3.2 «Порівняння отриманих чисельних результатів із результатами інших авторів» для верифікації результатів розв'язання задачі про визначення коефіцієнта концентрації напружень в оболонках, ослаблених круговим отвором, отриманих на основі лінійного МСЕ-аналізу наведено порівняння з аналітичними результатами, отриманих V. Дуке та експериментальними даними А. Я. Александрова, М. Х. Ахметзянова і А. С. Ракіна. Під зміною параметра β мається на увазі зміна розміру отвору r .

В процесі МСЕ-дослідження визначена довжина оболонки, яка дає найбільш близькі розв'язки до результатів зазначених авторів – $L/R = 20,7$. У цьому випадку МСЕ-розв'язок знаходяться в задовільній узгодженості з наведеними даними.

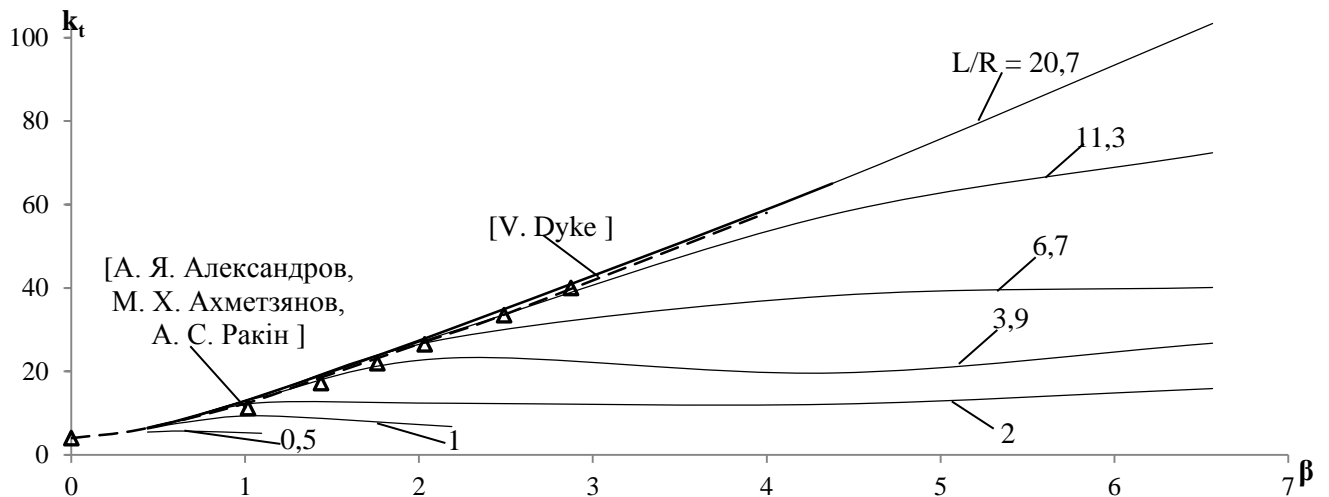


Рисунок 1 – Залежності коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від параметра β для різних довжин оболонок (L/R)

У підрозділі 3.3 «Вибір сіткових моделей і контроль точності розв'язку» представлені результати дослідження вибору ефективних сіткових моделей для вирішення задач визначення швидкозмінних напружено-деформованих станів у циліндричних оболонках з отвором та запропоновано алгоритм оцінки і контролю точності розв'язку.

Розроблено процедуру підвищення якості SE-сіток. Отримано, що досягти збіжності розв'язку вдається шляхом комбінування двох дій. На першому кроці визначається щільність чотирикутної сітки уздовж межі отвору послідовним подрібненням елементів. На другому кроці використовується прийом поділу чотирикутних елементів в граничному ряді, розташованих уздовж межі отвору, на пари трикутних. Дослідження показало, що використання лінійних трикутних елементів у зонах концентрації напружень може давати результат точніше, на відміну від чотирикутних елементів.

Для визначення точності обчислень і контролю якості сіток розроблено алгоритм заснований на властивості лінійної моделі розрахунку НДС для довгих оболонок, яка полягає у тому, що коефіцієнт концентрації напружень не залежить від рівня навантаження і від довжини оболонки та визначається параметром β .

У підрозділі 3.4 «Вплив зміни довжини оболонки і крайових ефектів на напружений стан» за допомогою лінійного МСЕ-аналізу досліджено вплив зміни довжини оболонки та розміру отвору на коефіцієнт концентрації напружень. Виконано дослідження межі області застосовності моделі А. І. Лур'є в задачі про визначення напруженого стану оболонок скінченних довжин, ослаблених отвором в широкому діапазоні його розмірів.

Наведено залежності k_t від L/R при різних значеннях β (рис. 2, 3). Отримано, що для невеликих отворів криві залежностей k_t від L/R можуть бути поділені на дві ділянки (рис. 2). Координата точок розділу кривих L^*/R позначено як «*». Ліві частини кривих (діапазон L/R від 0 до L^*/R) ілюструють зменшення коефіцієнта концентрації напружень зі скороченням оболонки, яке може бути багаторазовим по відношенню до $k_t(L/R = 20,7)$. Праві ділянки кривих ($L/R > L^*/R$) демонструють

практичну незалежність k_t від довжини оболонки. Для великих отворів (рис. 3) k_t істотно зростає на всьому розглянутому діапазоні довжин.

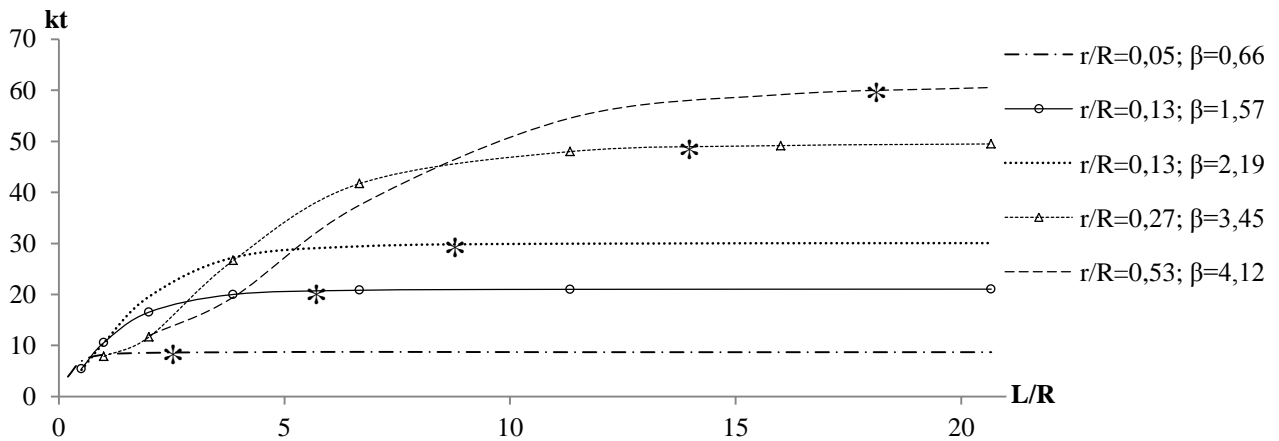


Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від параметра довжини оболонки (L/R) при фіксованому $\beta = [0,66; 4,89]$

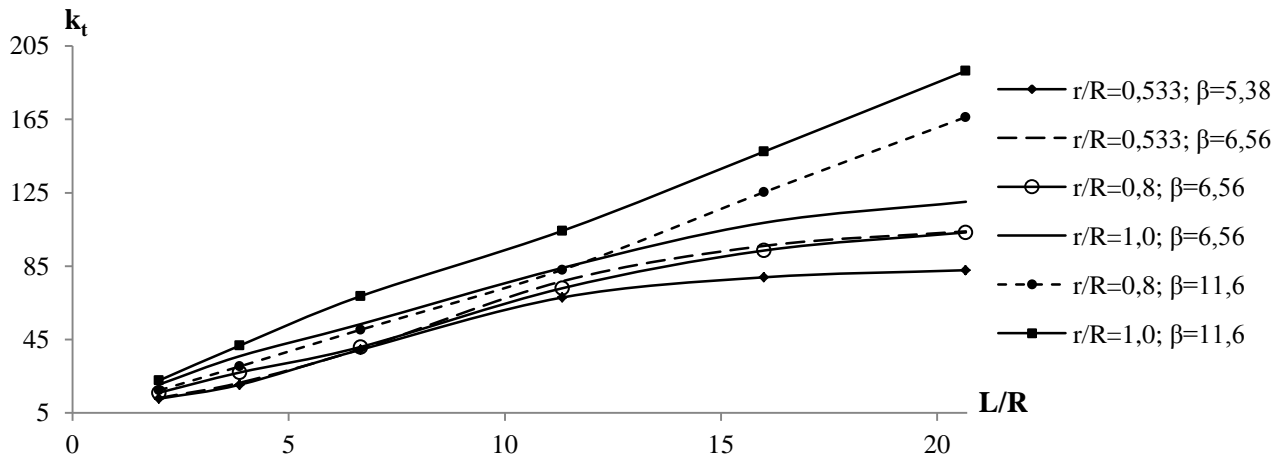


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від параметра довжини оболонки (L/R) при фіксованому $\beta = [5,38; 11,6]$

Виявлено, що модель А. І. Лур'є може бути придатною для оболонок достатньо великих довжин з малими отворами за умови $L/R > L^*/R$. При її застосуванні до оболонок скінченних довжин з $L/R < L^*/R$ отримані k_t можуть бути багаторазово завищені.

У підрозділі 3.5 «Чисельний аналіз напруженого стану оболонок скінченної довжини» представлені результати дослідження ступені неоднорідності загального поля напружень із віддаленням від отвору. Проаналізовано напруження у зонах їх концентрації на границі отвору і перерізах оболонки, перпендикулярних до її осі, розташованих біля отвору і ділянках, прилеглих до торців.

Показано, що припущення лінійної задачі про швидке згасання збуреної частини поля напруженого стану, викликаного отвором не завжди узгоджується з оболонками скінченних довжин. Для оболонок довжинами $L < L^*$ воно стає невірним.

Отриманий результат вказує на необхідність обережного ставлення до використання припущення про однорідний напружений стан поблизу країв оболонки навіть на випадок оболонки, послабленої малим отвором.

У четвертому розділі «Дослідження напружено-деформованого стану оболонок з отворами в геометрично нелінійній постановці» представлено результати дослідження НДС і коефіцієнта концентрації напружень в процесі навантаження оболонок до втрати їх несучої здатності за допомогою геометрично нелінійного МСЕ-аналізу. Дослідження виконано з метою:

- визначення впливу величини навантаження на НДС і коефіцієнт концентрації напружень;
- визначення впливу зміни довжини оболонки і розміру отвору на НДС та коефіцієнт концентрації напружень;
- дослідження характеру розвитку полів напружень і переміщень у процесі навантаження;
- порівняння розв'язків, отриманих у лінійній постановці та з урахуванням геометричної нелінійності між собою для визначення умов застосовності лінійного МСЕ-аналізу.

У підрозділі 4.1 «Аналіз напруженого стану в процесі навантаження» представлені результати дослідження ступені неоднорідності загального поля напружень із віддаленням від отвору зі зростом навантаження.

Аналіз напруженого стану, отриманого з урахуванням геометричної нелінійності показав, що на відміну від лінійного розв'язку, поля напружень зазнають якісних змін при збільшенні крутного моменту M_k , як на межі отвору, так і в значній області навколо нього.

Результати, одержані для початкового етапу навантаження, збігаються з розв'язком задачі в лінійному наближенні, величина відповідного діапазону навантаження суттєво залежить від комбінації розмірів отвору та довжини оболонки.

Показано, що для оболонок довжинами з $L < L^*$ збурення полів напружень, які виникають біля отвору на початковому етапі навантаження, зі зростом навантаження досягають країв оболонки.

У підрозділі 4.2 «Вплив величини навантаження і нелінійності деформацій на рівень концентрації напружень» представлені результати дослідження коефіцієнта концентрації напружень, його зміни, трансформації полів напружень в оболонці, напружень на кромці отвору у процесі зросту навантаження. Виконано параметричний аналіз для різних значень L/R и r/R , при фіксованому відношенні радіуса до товщини $R/h = 163$.

На основі геометрично нелінійного аналізу, для кожної оболонки з отвором із заданими параметрами довжин і отворів обчислюються граничні значення крутного моменту $M_{гр}$.

На рис. 4 – 6 приведені залежності коефіцієнтів концентрації напружень від навантаження $M_k/M_{гр}$, для різних розмірів отворів і довжин оболонок.

Максимальні за абсолютною величиною напруження σ_{max} , які визначають k_t , завжди знаходяться на кромці отвору, на внутрішній поверхні оболонки і є найменшими (з урахуванням знаку) головними напруженнями (σ_3).

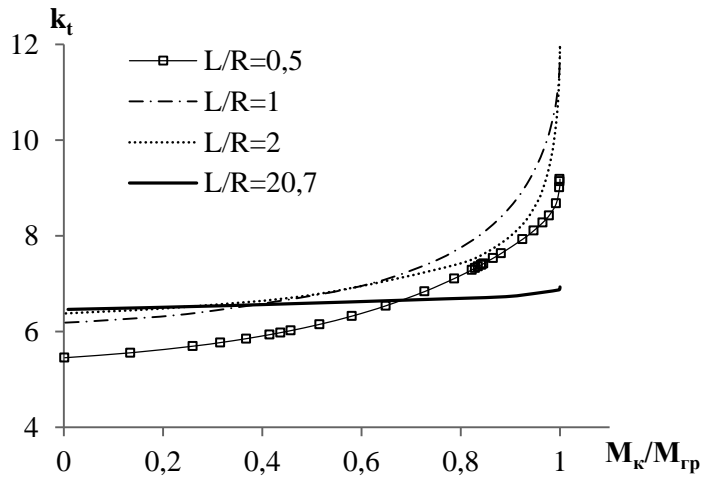
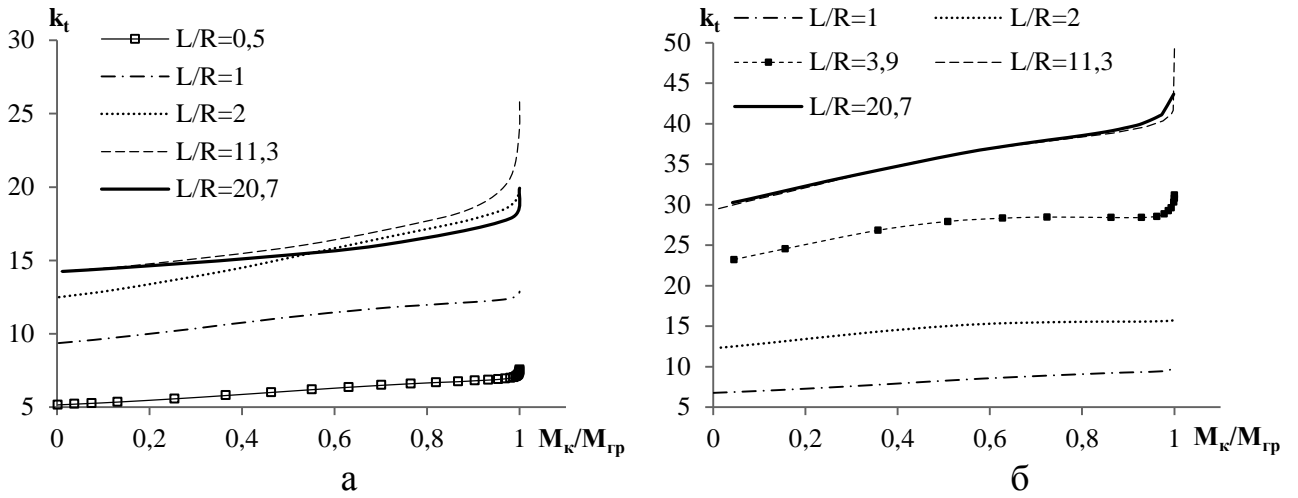
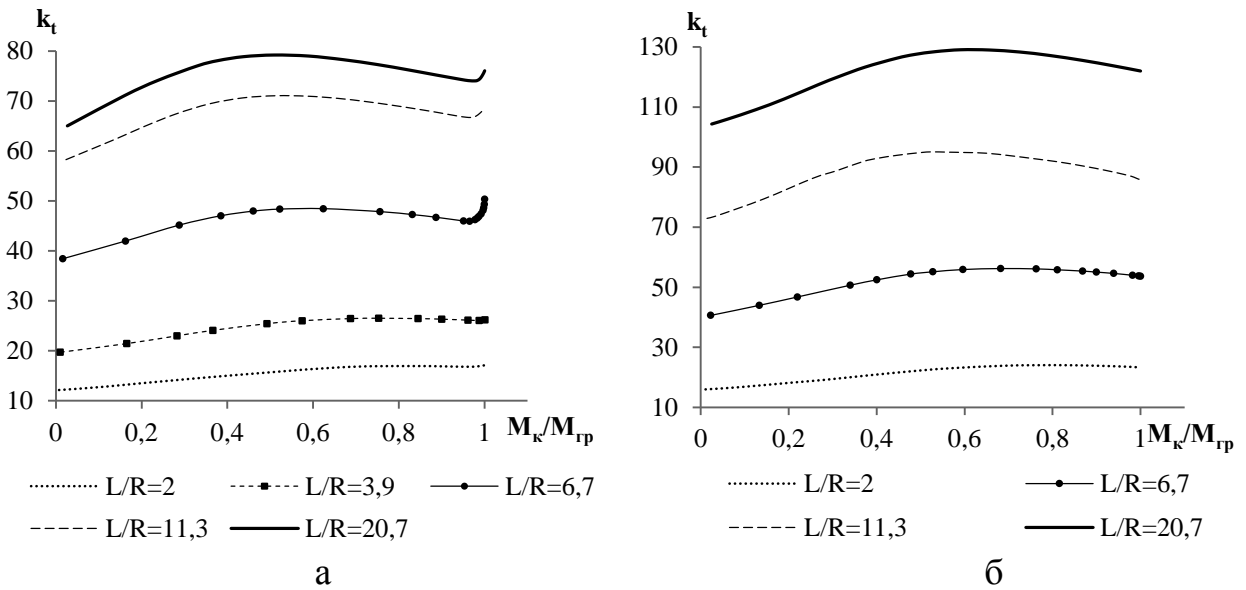


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від навантаження ($M_k/M_{гр}$) для малого отвору, $r/R = 0,05$



а – $r/R = 0,13$; б – $r/R = 0,27$

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від навантаження ($M_k/M_{гр}$) для середніх отворів



а – $r/R = 0,53$; б – $r/R = 0,8$

Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта концентрації напружень (k_t) від навантаження ($M_k/M_{гр}$) для великих отворів

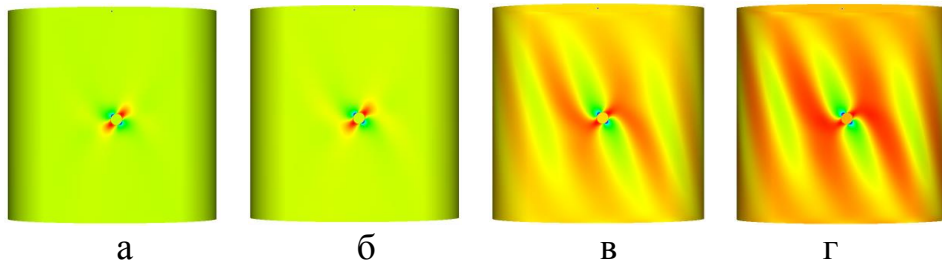
Виявлено, що коефіцієнти концентрації напружень, отримані при врахуванні геометричної нелінійності деформації, залежать не лише від геометричних параметрів, але і від рівня навантаження.

Мінімальні значення k_t на початку приведених кривих, тобто на початку навантаження, збігаються із величинами, отриманими в лінійному наближенні.

Для малих і середніх отворів k_t монотонно зростає на всьому діапазоні навантаження (рис. 4 – 5), крім $L/R = 20,7$ з $r/R = 0,05$. Для великих отворів k_t може досягати максимального значення в середній частині діапазону навантаження (рис. 6). Необхідно підкреслити, що падіння k_t (рис. 6) не означає падіння максимальних напружень в зоні їх концентрації, але веде до уповільнення їх зростання при збільшенні навантаження.

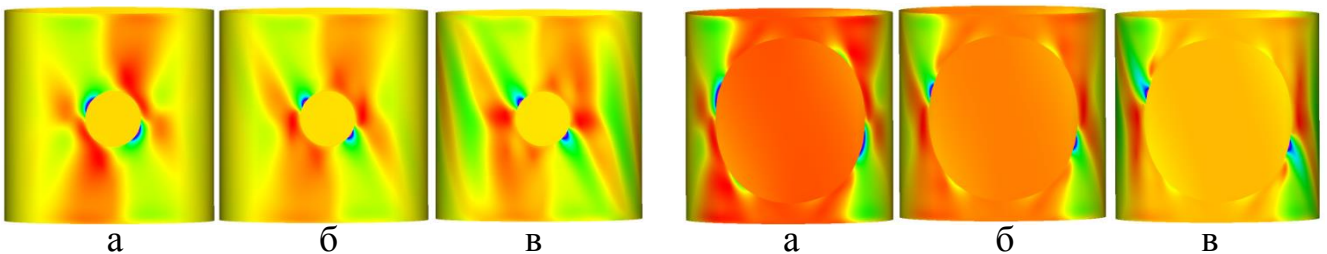
На рис. 7 – 9 показана трансформація полів найменших головних напружень σ_3 на внутрішній поверхні оболонок (де і знаходяться зони концентрації напружень з найбільшим k_t) залежно від $M_k/M_{гр}$ на прикладі $L/R = 2$. Дані наведені при трьох рівнях навантаження: на початковому етапі $M_k/M_{гр} = 0,01$, в середині діапазону $M_k/M_{гр} = 0,5 \div 0,65$ і в передграничному стані $M_k/M_{гр} = 0,99 \div 0,999$. Зони максимальних рівнів стиснюючих напружень відображені фіолетовим кольором, розтягуючих – червоним.

Зони концентрації напружень розташовані діаметрально та локалізовані у вигляді вузьких смужок. Із зростанням навантаження вони поширюються в радіальному напрямі під певним кутом θ , одночасно звужуючись в кільцевому напрямі.



а – $M_k/M_{гр} = 0,04$; б – $M_k/M_{гр} = 0,5$; в – $M_k/M_{гр} = 0,99$; г – $M_k/M_{гр} = 0,999$

Рисунок 7 – Поля напружень σ_3 на внутрішній поверхні оболонки, $L/R = 2$, $r/R = 0,05$



а – $M_k/M_{гр} = 0,02$; б – $M_k/M_{гр} = 0,65$;
в – $M_k/M_{гр} = 0,99$

Рисунок 8 – Поля напружень σ_3 на внутрішній поверхні оболонки, $L/R = 2$, $r/R = 0,27$

а – $M_k/M_{гр} = 0,01$; б – $M_k/M_{гр} = 0,57$;
в – $M_k/M_{гр} = 0,999$

Рисунок 9 – Поля напружень σ_3 на внутрішній поверхні оболонки, $L/R = 2$, $r/R = 0,8$

У разі малого розміру отвору, відчутний перерозподіл полів напружень відбувається тільки при наближенні до моменту втрати несучої здатності (рис. 7). Для середніх і великих отворів з самого початку процесу навантаження картини розподілу напружень в міру збільшення отвору носять все більш складний характер (рис. 8 – 9). Неоднорідність поля напружень біля країв оболонки з'являється з початку навантаження (рис. 8 а, рис. 9 а).

Навіть для відносно довгих оболонок неоднорідність загального поля напружень збільшується і поширюється до країв, в зв'язку з чим підтримуюча роль їх впливу на коефіцієнт концентрації напружень стає визначальною.

Аналіз отриманих результатів показав, що лінійний МСЕ-аналіз придатний для визначення напруженого стану тільки для довгих оболонок з малими отворами. У випадку немалих отворів, навіть при великих довжинах оболонок вказаний аналіз може використовуватися на початковому етапі навантаження.

Врахування нелінійності деформації показало, що поля напружень оболонок, як і зони концентрації напружень, істотно трансформуються із зростанням навантаження і змінюють свою топологію. На відміну від лінійної постановки задачі, при якій коефіцієнт концентрації напружень не залежить від навантаження, врахування нелінійності у більшості випадків показує його підвищення на десятки відсотків в певних частинах повного діапазону навантаження.

У підрозділі 4.3 «Формування тривимірних полів переміщень у процесі навантаження» представлено аналіз компонентних полів переміщень оболонок на всьому діапазоні статичного деформування до вичерпання їх несучої здатності.

В цілому картини розвитку полів переміщень демонструють динаміку нелінійних змін, особливо при навантаженнях, близьких до граничних. Зона переміщень біля отвору, що з'являється при початковому навантаженні, розширюється при зростанні навантаження і для крутних моментів, близьких до граничних, може поширюватися до країв оболонки. Зона максимальних прогинів (випучин), спрямованих назовні, яка співпадає із зоною концентрації напружень, завжди знаходиться на контурі отвору, обмежено переміщаючись уздовж кромки при зміні крутного моменту. Зони максимальних вм'ятин можуть переміщатися як уздовж контуру отвору, так і в радіальному напрямку від нього.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, у якій розв'язана актуальна наукова задача про визначення напружено-деформованого стану пружних ізотропних тонких циліндричних оболонок скінченних довжин, ослаблених круговим отвором при дії крутного моменту з використанням лінійного та геометрично нелінійного аналізів методу скінченних елементів.

Основними науковими і практичними результатами є:

– Запропоновано алгоритм розробки ефективної скінченно-елементної моделі для визначення швидкозмінних напружено-деформованих станів у циліндричних оболонках з отвором, заснований на застосуванні адаптивних сіток в сукупності зі спеціально сформульованими методами контролю точності.

– Проведено дослідження напружено-деформованого стану, зокрема коефіцієнту концентрації напружень тонких оболонок в широкому діапазоні скінченних довжин та розміру отворів в лінійній постановці методом скінченних елементів. Виявлено, що для невеликих отворів вкорочення оболонки приводить до зниження рівня концентрації напружень починаючи з певної довжини, для великих отворів зменшення довжини оболонки завжди веде до його зниження.

– Проведено дослідження впливу нелінійності деформацій на напружено-деформований стан та коефіцієнт концентрації напружень в процесі навантаження оболонки. Для оболонок скінченних довжин збурюючі частини полів напружень і переміщень, що вносяться отвором, при збільшенні рівня навантаження зростають і розповсюджуються навколо отвору досягаючи її країв. Проаналізовано змінність напруженого стану уздовж границі отвору та в зоні між отвором та краями оболонки із зростом навантаження. Отримано, що зони концентрації напружень переміщуються уздовж отвору, а в крайовому перерізі оболонки змінюється характер розподілу напружень і зростають їх амплітудні значення. Виявлено, що коефіцієнт концентрації напружень може зростати на десятки відсотків в певних частинах повного діапазону навантаження, в залежності від комбінації розмірів отвору і довжини оболонки.

– Порівняння розв'язків, отриманих методом скінченних елементів у лінійній і геометрично нелінійній постановках показало, що лінійний аналіз застосовний тільки на початковому етапі навантаження в обмеженому діапазоні навантажень, величина якого суттєво залежить від геометричних розмірів оболонки та отвору. Тільки у випадку довгих оболонок, послаблених малим отвором, лінійний аналіз дозволяє одержати задовільні результати практично на всьому діапазоні навантаження до передграничних значень.

– Досліджено межі застосовності широкоживаної лінійної моделі А. І. Лур'є в задачі про визначення рівня концентрації напружень в оболонках скінченних довжин, ослаблених круговим отвором в широкому діапазоні його розмірів. Отримано, що модель може застосовуватися для оболонок великих довжин з малими отворами, при цьому оболонка повинна бути довше певної довжини L^* , та не придатна для оболонок з немалими отворами, навіть при умові їх великої довжини. При застосуванні зазначеного підходу до оболонок з $L/R < L^*/R$ коефіцієнти концентрації напружень можуть бути багаторазово завищені.

Таким чином, для правильної оцінки міцності оболонок скінченних довжин, ослаблених круговим отвором із зростанням навантаження необхідно враховувати геометричну нелінійність деформування при розрахунку.

В результаті проведеної роботи, розроблено рекомендації, щодо отримання достатньо точних розв'язків задачі про визначення рівня концентрації напружень біля кругових отворів в тонкостінних оболонках, які стануть корисними для інженерів. Отримані дані про закономірності розвитку напружень та переміщень біля отвору, дані про залежності коефіцієнта концентрації напружень у процесі навантаження та від зміни довжини оболонки і розміру отвору можуть використовуватися для розробки раціонального підкріплення отвору та дозволять зменшувати вагу несучих конструкцій.

Результати дослідження впроваджені у практиці Державного підприємства

«Конструкторське Бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля при проектуванні ракети космічного призначення, зокрема адаптеру та головного обтічника в рамках роботи за міжнародним контрактом за темою «АКРК-2».

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, занесених у наукометричні бази даних (Index Copernicus, SCOPUS):

1 Kolodiaznyi A. The influence of the deformation nonlinearity on stress concentration in cylindrical shells with holes under torsion / A. Kolodiaznyi, M. Mednikova. // *Materials Science*, Vol. 968, 2019. PP. 548 – 559.

2 Медникова М. А. Контроль точности решения при определении напряженного состояния в ослабленных отверстием цилиндрических оболочках / М. А. Медникова // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкції* – Вип. 29. – 2019. – С. 175 – 187.

Статті у фахових виданнях України:

3 Колодяжний А. П. Напряженное состояние цилиндрической оболочки, ослабленной круговым отверстием, при кручении / А. П. Колодяжний, М. А. Медникова // *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. : Механіка.* – 2015. – Вип. 19. – Т. 2. – С. 64 – 76.

4 Колодяжний А. П. Трехмерные поля перемещений при кручении цилиндрических оболочек с отверстием / А. П. Колодяжний, М. А. Медникова // *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. : Механіка неоднорідних структур.* – 2016. – Вип. 1(20). – С. 21 – 37.

5 Колодяжний А. П. Напряжения в тонкой цилиндрической оболочке с круговым отверстием при кручении / А. П. Колодяжний, М. А. Медникова // *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. : Механіка неоднорідних структур.* – 2017. – Вип. 2(21). – С. 55 – 68.

Роботи у матеріалах наукових конференцій і збірниках тез доповідей:

6 Колодяжний А. П. КЭ-моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки с отверстием / А. П. Колодяжний, М. А. Медникова // *Человек и космос: Тез. докл. XIX междунар. науч.-практ. конф.*, 12 – 14 апреля, 2017 г. – Днепр, 2017. – С. 174.

7 Колодяжний А. П. Дослідження переміщень при крученні циліндричних оболонок з отвором / А. П. Колодяжний, М. А. Меднікова // *Актуальні проблеми інженерної механіки : Тез. доп. IV міжнар. наук.-практ. конф.*, 16 – 19 травня, 2017 р. – Одеса, 2017. – С. 70 – 71.

8 Колодяжний А. П. Концентрация напряжений в оболочечных конструкциях с отверстиями при кручении / А. П. Колодяжний, М. А. Медникова // *Космические технологии: настоящее и будущее : Тез. докл. 6-й междунар. конф.*, 23 – 26 мая 2017 г. – Днепр, 2017. – С. 29.

9 Колодяжний А. П. О влиянии нелинейного деформирования на концентрацию напряжений в цилиндрических оболочках, ослабленных круговым

отверстием / А. П. Колодяжный, М. А. Медникова // Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні : Тези доп. I міжнар. наук.-техн. конф., 10 – 14 вересня 2018 р. – Харків, 2018. – С. 33.

10 Колодяжный А. П. Про межі застосовності моделі А. І. Лур'є в задачах напружено-деформованого стану оболонок з круговим отвором / А. П. Колодяжный, М. А. Медникова // Сучасні проблеми механіки та математики: Зб. наук. праць міжнар. наук.-техн. конф., 22 – 25 травня 2018 р. – Львів, 2018. – С. 103 – 104.

11 Колодяжный А. П. Геометрически нелинейный анализ напряженного состояния цилиндрических оболочек с отверстием при кручении / А. П. Колодяжный, М. А. Медникова // Актуальні проблеми інженерної механіки: Тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф., 20 – 24 травня 2019 р. – Одеса, 2019. – С. 364 – 365.

12 Медникова М. А. Напряженное состояние в цилиндрических оболочках конечной длины с отверстием / М. А. Медникова, А. П. Колодяжный, В. Н. Сиренко // Космические технологии: настоящее и будущее : Тез. докл. 7-й междунар. конф., 21 – 24 мая 2019 г. – Днепр, 2019. – С. 38.

13 Колодяжный А. П. Эффекты влияния отверстия на устойчивость цилиндрических оболочек при кручении. Численные и модельные эксперименты / А. П. Колодяжный, М. А. Медникова // Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій: Тези доп. II міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті академіка В. І. Моссаковського, 10 – 12 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – С. 165.

АНОТАЦІЯ

Медникова М. А. Вплив кругових отворів на напружено-деформований стан циліндричних оболонок скінченної довжини при крученні – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) пружних ізотропних циліндричних тонкостінних оболонок скінченних довжин, ослаблених круговим отвором при дії крутного моменту.

За допомогою лінійного і геометрично нелінійного аналізів методом скінченних елементів (МСЕ) досліджений вплив зміни геометричних параметрів на напружений стан, зокрема на коефіцієнт концентрації напружень. На основі лінійного МСЕ-аналізу розроблені ефективні сіткові моделі для розв'язування задач визначення НДС у циліндричних оболонках з отвором, ґрунтовані на застосуванні адаптивних сіток у сукупності зі спеціально сформульованими методами контролю точності.

Показано, що математична модель А. І. Лур'є застосовна до оболонок великої довжини і для малого розміру отвору, і непридатна для коротких оболонок і для оболонок, ослаблених великим отвором. Використання зазначеної моделі до оболонок скінченних довжин може багаторазово завищувати результати розв'язку задачі про визначення рівня концентрації напружень.

Для широкого діапазону зміни геометричних параметрів оболонок результати, отримані в нелінійній постановці близькі до результатів з лінійного розв'язку тільки для початкового етапу навантаження і в досить вузькому діапазоні навантажень. При врахуванні геометричної нелінійності деформації, поля напружень і поля переміщень із зростанням навантаження, особливо при наближенні до вичерпання несучої здатності, зазнають якісних змін, як на межі, так і в значній області навколо отвору. Основна увага приділена дослідженню концентрації напружень і залежностям коефіцієнта концентрації напружень від величини навантаження, довжини оболонки і розміру отвору. Із ростом навантаження коефіцієнт концентрації напружень зростає для усіх досліджуваних оболонок. Виняток становлять оболонки великої довжини з малим розміром отвору, для яких він практично не залежить від рівня навантаження. Виявлено, що існує деяка довжина, зі зменшенням якої починає позначатися підтримувальний вплив краю оболонки, який виражається в істотному зниженні рівня концентрації напружень.

Результати дослідження впроваджені у практиці підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля при проектуванні ракети космічного призначення, зокрема адаптеру та головного обтічника в рамках роботи за міжнародним контрактом.

Ключові слова: метод скінченних елементів, циліндрична оболонка, круговий отвір, кручення, напружено-деформований стан, коефіцієнт концентрації напружень.

АННОТАЦИЯ

Медникова М. А. Влияние круговых отверстий на напряженно-деформированное состояние цилиндрических оболочек конечной длины при кручении – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, г. Днепр, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) упругих изотропных цилиндрических тонкостенных оболочек конечных длин, ослабленных круговым отверстием при действии крутящего момента.

С помощью линейного и геометрически нелинейного анализов методом конечных элементов (МКЭ) исследовано влияние изменения геометрических параметров на напряженное состояние, в частности на коэффициент концентрации напряжений. На основании линейного МКЭ-анализа разработаны эффективные сеточные модели для решения задач определения НДС в цилиндрических оболочках с отверстием, основанные на применении адаптивных сеток в совокупности со специально сформулированными методами контроля точности.

Показано, что математическая модель А. И. Лурье применима к оболочкам большой длины и для малого размера отверстия, и непригодна для коротких оболочек, и для оболочек, ослабленных большим отверстием. Применение

указанной модели к оболочкам конечных длин может многократно завышать результаты решения задачи об определении уровня концентрации напряжений.

Для широкого диапазона изменения геометрических параметров оболочек результаты, полученные в нелинейной постановке близки к результатам из линейного решения только для начального этапа нагружения и в достаточно узком диапазоне нагрузок. При учете геометрической нелинейности деформирования, поля напряжений и поля перемещений с ростом нагрузки, особенно при приближении к исчерпанию несущей способности, претерпевают качественные изменения, как на границе, так и в значительной области вокруг отверстия. Основное внимание уделено исследованию концентрации напряжений и зависимостям коэффициента концентрации напряжений от величины нагрузки, длины оболочки и размера отверстия. С ростом нагрузки коэффициент концентрации напряжений возрастает для всех исследованных оболочек. Исключение составляют оболочки большой длины с малым размером отверстия, для которых он практически не зависит от уровня нагрузки. Обнаружено, что существует некоторая длина, с уменьшением которой сказывается поддерживающее влияние края оболочки, которое выражается в существенном снижении уровня концентрации напряжений.

Результаты исследования внедрены на практике предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля при проектировании ракеты космического назначения, в частности адаптера и головного обтекателя в рамках работы по международному контракту.

Ключевые слова: метод конечных элементов, цилиндрическая оболочка, круговое отверстие, кручение, напряженно-деформированное состояние, коэффициент концентрации напряжений.

ABSTRACT

Mednikova M. The influence of circular holes on the stress-strain state of cylindrical shells of finite lengths during torsion. – Manuscript.

A Dissertation for a Candidate Degree in Technical sciences in the specialty 01.02.04 – Mechanics of deformable solids, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, 2020.

The dissertation work is devoted to the study of the stress-strain state (SSS) of elastic isotropic cylindrical thin-walled shells of finite lengths, weakened by a circular hole under the action of a torque.

With the help of linear and geometrically nonlinear analyses with finite element method (FEM), the influence of changes of geometric parameters on the stress state, in particular on stress concentration factor, has been investigated. Effective grid models have been developed for solving the problems of determining stress-strain state in cylindrical shells with a hole, on the basis of liner FEM-analysis, based on the use of adaptive grids together with specially formulated methods of accuracy control

It is shown that mathematical model of A. Lurie is applicable for large length shells and for small size of a hole, and is unsuitable for short shells and for shells weakened by a large hole. This model can overestimate the results of solving the problem of determining

the level of stress concentration many times over in relation to the deformation of shells of finite lengths.

For a wide range of changes in geometric parameters of shells, the results obtained in the nonlinear formulation are close to results from the linear solution only for the initial stage of loading and in a rather narrow range of loads. Taking into account the geometric nonlinearity of deformation, stress fields and displacement fields with increasing load, especially when approaching the depletion of the bearing capacity, undergo qualitative changes, both at the boundary and in a significant area around the hole. The main attention is paid to the study of the stress concentration and dependences of stress concentration factor on the load value, shell length and hole size. Stress concentration factor increases with increasing load for all studied casings. The exception is shells of large length with a small hole size, for which it is practically independent from the load level. It is obtained that there is a certain length determined by calculations, with a decrease of this length the supporting effect of the shell edge begins to bear on, which significantly decrease level of stress concentration.

The results of the research were intruded in practice of the State “Design Office “Yuzhnoye” named after M. K. Yangel” in the design of a space rocket, in particular adapter and head fairing as part of an international contract.

Key words: finite element method, cylindrical shell, circular hole, torsion, stress-strain state, stress concentration factor.

Підписано до друку 26.01.2021 р. Формат 60 x 90/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 2,3 Обл.-вид. арк. 2,4
Тираж 100 прим. Зам. № 1138
Віддруковано ФОП «Кучугурний Ю.М.»,
свідоцтво про державну реєстрацію №2 224 000 0000 073863
49000, вул. Воскресенська, 11, м. Дніпро.
Тел.: (096) 423-60-71