

INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC

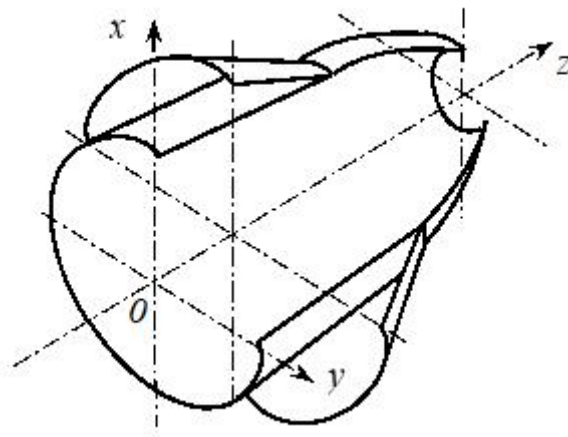
*ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE
MPTM 2024*

April 18-19, 22, 2024
Dnipro, Ukraine

Book of Abstracts
Part 1; 2

**МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ
МЕХАНІКИ – 2024**

Матеріали конференції



Дніпро – 2024

МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2024

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Стеблянко П.О.

Заступники голови: Дзюба А.П., Крилова Т.В., Пошивалов В.П.

ТЕМАТИКА ДОПОВІДЕЙ

1. Механіка деформівного твердого тіла, механіка рідини, газу та плазми.
2. Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті.

ЗМІСТ

<i>Симпозіум</i> <i>(присвячений пам'яті член-кореспондента НАН України</i> <i>В.С. Гудрамовича)</i> <i>Секція Механіка</i> <i>Секція Іноваційні технології</i>	сторінка 3 сторінки 21-23 сторінки 97-98
--	---

*В межах першої частини конференції проведено Симпозіуму
«Механіка деформівних тіл і конструкцій», пам'яті член-кореспондента НАНУ
В.С. Гудрамовича*

*В рамках другої частини конференції (вересень 2024 р.) проведено Симпозіум
«Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій», присвячений 105-й
річниці від дня народження академіка В.І. Моссаковського*

**XXIV МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
“МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2024”**

Частина 1 (квітень 2024)

*Симпозіум «Механіка деформівних тіл і конструкцій»,
пам'яті член-кореспондента НАН України В.С. Гудрамовича
(22 квітня 2024)*

ЗМІСТ

1.(52) А.П. Дзюба ТАКИМ МИ ЙОГО ПАМ'ЯТАЄМО (пам'яті член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Вадима Сергійовича Гудрамовича)	4
2(103) В. Т. Грінченко ПАМ'ЯТІ ДРУГА, ПРОФЕСОРА В.С. ГУДРАМОВИЧА	10
3(104) Е.Л. Гарт ПАМ'ЯТІ МОГО ВЧИТЕЛЯ, ПРОФЕСОРА В.С. ГУДРАМОВИЧА	11
4(92) Р. М. Кушнір, Ю. В. Токовий МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ У ТІЛАХ З БАГАТОШАРОВИМИ ПОКРИТТЯМИ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНИХ ОБМЕЖУВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ	12
5(13) В.П.Пошивалов, Ю.Ф. Данієв ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ МЕТОДІВ І НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	13
6(51) А.П. Дзюба, В.М. Сіренко МЕТОДОЛОГІЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ	14
7(80) O.R.Hachkevych, T.V. Kozakevych, T.Wolczanski STRUCTURAL AND RESIDUAL STRESS STATE OF STEEL PLATES SUBJECTED TO THE HEATING OF MOVING HEAT SOURCES	16
8(25) О.П. Круковський, Г.І. Ларіонов, Ю.В. Земляна ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ШТАНГИ АНКЕРА З ФІКСУЮЧОЮ СУМІШЮ	16
9(60) P.O. Steblyanko SIMULATION OF THERMOPLASTIC BEHAVIOR OF ELEMENTS OF STRUCTURES DEPENDING ON THE FUNCTIONAL STATE OF THE MATERIAL STRUCTURE	17
10(31) І.В. Добров, А.В. Сьомічев, О.М. Павленко ЗАСТОСУВАННЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИКИ ВІЛЬНОГО ОБЕРТАННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА НАВКОЛО НЕРУХОМОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ОСІ	18
11(11) А.Ю.Дреус, А.В. Сохацький, М.В.Ємець ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФІЛЯ КРИЛА З УРАХУВАННЯМ ЕКРАННОГО ЕФЕКТУ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	19

ТАКИМ МИ ЙОГО ПАМ'ЯТАЄМО

*(пам'яті член-кореспондента НАН України, д-ра техн. наук, професора
Вадима Сергійовича Гудрамовича)*



12 травня 2023 року пішов з життя відомий учений-механік член-кореспондент НАН України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, премій НАН України ім. С.П. Тимошенка та ім. М.К. Янгеля, доктор технічних наук, професор **Вадим Сергійович Гудрамович**.

Вадим Сергійович народився 6 липня 1936 року у м. Чапаєвськ Куйбишевської області (Росія). У 1959 р. закінчив з відзнакою фізико-технічний факультет Дніпропетровського державного університету (ДДУ). У 1959-65 рр. працював у КБ «Південне» (у той час ОКБ-586), а з 1966 р. – в Інституті технічної механіки НАН України, де з 1975 р. був завідувачем відділу міцності і надійності конструкцій і водночас (з 1976 р.) професором ДДУ. В 1963 р. вступив до заочної аспірантури ДДУ під науковим керівництвом проф. В.І. Моссаковського.



**Член-кор. НАНУ В.С. Гудрамович один із перших аспірантів
академіка НАНУ В. І. Моссаковського**

Кандидат технічних наук (1964 р.), старший науковий співробітник (1968 р.), доктор технічних наук за спеціальністю «Проектування, виробництво та випробування літальних апаратів» (1973 р.), професор (1979 р.), член-кореспондент НАН України Відділення механіки за спеціальністю «Механіка» (1995 р.).

Будучи яскравим і талановитим представником та послідовником ідей створеної академіком В.І. Моссаковським наукової школи механіки, Вадим Сергійович завжди приділяв велику увагу підготовці наукових кадрів вищої кваліфікації. Під керівництвом В.С. Гудрамовича захищено 4 докторських та 15 кандидатських дисертацій. Протягом багатьох років Вадим Сергійович був професором кафедри обчислювальної механіки і міцності конструкцій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.



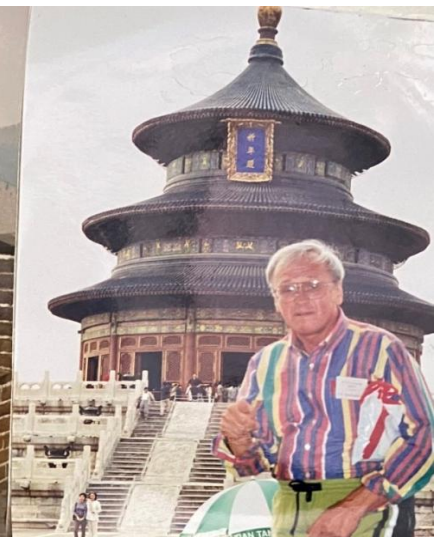
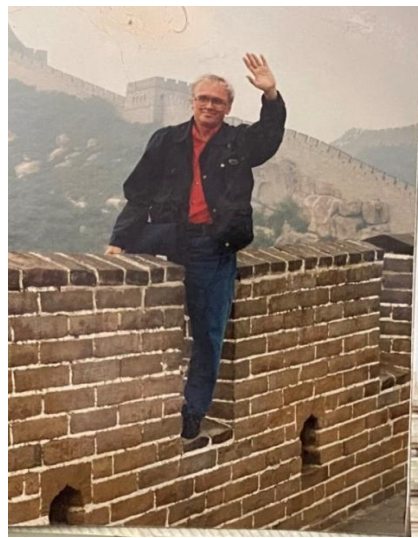
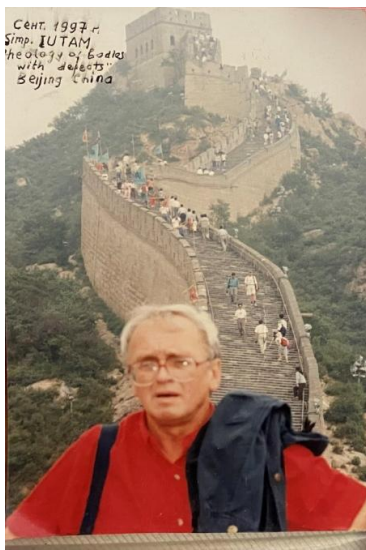
**Більше 50 років життя В. С. Гудрамовича
пов'язано з кафедрою В.І. Моссаковського (фото 2008 р)**

Вадим Сергійович був членом Експертної ради ВАК України з механіки деформівного твердого тіла (2000-2006 рр.), членом докторських спеціалізованих вчених рад із захисту дисертацій у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара (з 1995 по 2020 р.) та Запорізькому національному технічному університеті (з 2005 по 2020 р.). Він Почесний професор (з 2016 р.) Харбінського технологічного університету (Китай).

Вадиму Сергійовичу Гудрамовичу належать вагомі наукові здобутки в галузі нелінійної механіки, механіки деформівного твердого тіла, механіки контактних взаємодій, динаміки, міцності та стійкості неоднорідних оболонково-стрижневих систем та їх застосування до вирішення актуальних проблем створення ефективних конструкцій ракетно-космічної техніки, енергетики, транспорту, антенно-хвильових систем, обладнання нафтогазової промисловості. Вадим Сергійович розробив математичні моделі нелінійного деформування і критичних станів, ефективні методи розрахунку та нормативи міцності складних оболонково-стрижневих систем з пружно-в'язко-пластичними властивостями, що мають геометричні недосконалості, дефекти і пошкодження різної фізичної природи в екстремальних умовах експлуатації.

Під керівництвом В.С. Гудрамовича та за його безпосередньої участі створено оптимальні системи антенно-хвильової техніки, сонячної енергетики, розроблено безвідходні енергозберігаючі технології їх виготовлення, досліджено їх міцність та оптику, виготовлено різні типи сучасних антен, хвильоводів, концентраторів сонячної енергії, що використовуються в ракетно-космічній техніці, космічному зв'язку, енергетиці.

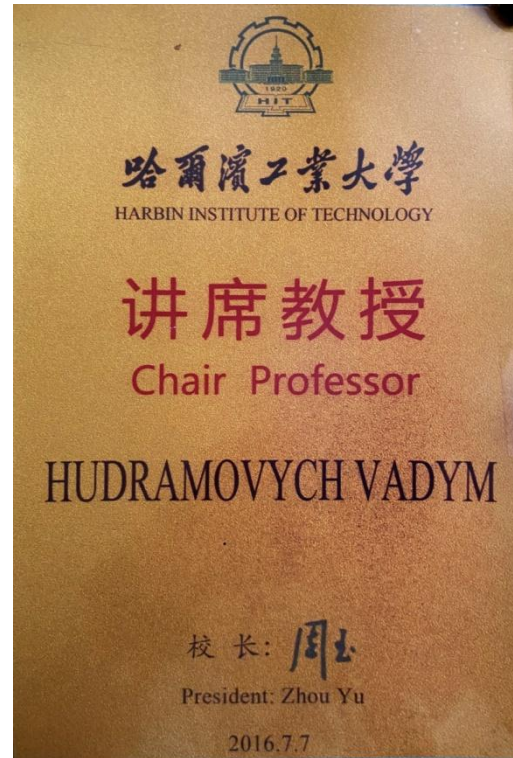
В.С. Гудрамович є автором понад 450 наукових публікацій і винаходів, серед них 12 монографій, 2 Держстандарти, 7 авторських свідоцтв та патентів на винахід, понад 200 статей, з яких більше 30 англійською мовою в провідних іноземних журналах, що входять до наукометричних баз даних (Scopus та ін.). Виступав з доповідями більше, ніж на 180 міжнародних науково-технічних конференцій з механіки та був членом більше, ніж 50 їх Організаційних комітетів. Виступав також з лекціями і доповідями в наукових центрах Італії, Китаю, Німеччини, Нідерландів, Польщі, Росії, Словенії, Туркменістану, Чехії та ін.



В Китаї за персональним запрошенням



На конференції у Львові



**Вручення Диплому Почесного професора
Харбінського технологічного університету**



На Хортиці (м. Запоріжжя)



У нашому Криму (м. Ялта)

Він був членом Секретаріату Національного комітету України з теоретичної і прикладної механіки (з 1993 р.); членом Правління і співголовою комісії з фізико-математичних проблем механіки руйнування Українського товариства з механіки руйнування матеріалів (з 1993 р.); Наукової ради «Механіка деформівного твердого тіла» при Відділенні механіки НАН України (1995 р.); керівником міжвузівського семінару при Придніпровському науковому центрі НАН України і МОН України «Проблеми механіки деформованих тіл і конструкцій»; членом експертних комісій з оцінювання роботи інститутів НАНУ; членом редколегій 4-х наукових фахових журналів з механіки: «Технічна механіка», збірника наукових праць «Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій», що індексуються у міжнародній наукометричній базі даних Index Copernicus; журналу «Russian Aeronautics» (Видавництво «Allerton Press, Inc», USA) (з 2013 р.); журналу «International Journal of Mathematical Physics» (Singapore) (з 2018 р.).

Діяльність В.С. Гудрамовича відзначена багатьма нагородами: Орденом Дружби народів (1990 р.), медаллю М.К. Янгеля Федерації космонавтики СРСР (1986 р.) за великий особистий внесок у розвиток вітчизняної техніки; медаллю Ю.В. Кондратюка Федерації космонавтики України, Почесною та Пам'ятною медалями «Академік Володимир Моссаковський» (2007 р., 2019 р.); Почесним знаком Президії НАН України «За наукові досягнення» (2008 р.); Почесним знаком Міністерства освіти і науки України «Відмінник освіти» (1998 р.); Медаллю «За заслуги» ДП «КБ «Південне» (2021 р.); Подякою Придніпровського наукового центру НАН України і МОН України (2021 р.) та ін. Він був лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки (1997 р.), премій НАН України ім. С.П. Тимошенка (2004 р.) та ім. М.К. Янгеля (1997 р.) за цикл праць «Процеси деформування матеріалів та граничні стани елементів конструкцій в умовах складного навантаження» та «Розробка експериментально-теоретичних методів та дослідження довговічності об'єктів ракетно-космічної техніки».



**На відпочинку серед друзів (Дніпро)
Такі фото вже неможливо повторити**

Вадим Сергійович до останніх днів свого життя активно працював. Він не мислив свого життя без праці, без науки. Завжди допомагав своїм учням і колегам. Його відрізняло принциповість, тонке відчуття справедливості, багатогранна ерудиція та енциклопедичність знань. Вадим Сергійович був дуже яскравою, інтелігентною, щирою і глибоко порядною людиною. Пам'ять про Вадима Сергійовича Гудрамовича назавжди залишиться в наших серцях.

Матеріали про наукову діяльність чл.-кор. НАН України, професора В. С. Гудрамовича увійшли до таких видань:

- «Творці української науки». Серія: Технічні науки, том. 2. Розділ 3: Машинознавство та механіка. - С. 93-98. - К. : Видавництво «Анавіт», 2021. 152 с.
- Вісник НАН України. 2016. № 7. С. 81.
- Відділення механіки НАН України. Історико-біографічний довідник. С. 173-174. К.: Академперіодика, 2015. 270 с.
- Енциклопедія сучасної України, том. 6. Го–Гю. К., 2006. С. 590–591.
- Славетне сузір'я окрилених університетом: нариси. ДНУ, 2008. С. 70-74.
- Професори Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро: Ліра, 2018. С. 82–83.
- Вісник Дніпровського університету. Сер.: Механіка неоднорідних структур. 2016. Вип. 1(20). С. 118–120.
- Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. 2023. Вип. 36. С. 142–144.

***Матеріали доповіді проф. А.П. Дзюби на МНК
«Математичні проблеми технічної механіки -2024»
Симпозіум пам'яті В.С. Гудрамовича.***

ПАМ'ЯТІ ДРУГА, ПРОФЕСОРА В.С. ГУДРАМОВИЧА

В. Т. Грінченко

*Інститут гідромеханіки НАНУ, Київ, Україна
(зі стенограми виступу на Симпозіумі)*

Вадим Сергійович Гудрамович, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України є відомим вченим у галузі проблем нелінійної механіки, механіки деформівного твердого тіла, динаміки і міцності конструкцій, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, премій НАН України ім. С.П. Тимошенка й ім. М.К. Янгеля, який усе своє життя присвятив служінню науці. Майже півстоліття він працював завідувачем відділу міцності і надійності конструкцій Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України і, водночас, професором Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Мій друг, Вадим Гудрамович, закінчив навчання на фізико-технічному факультеті Дніпропетровського державного університету у 1959 році. Практично одночасно зі мною. Це був особливий період у розвитку механіки. У той час активно працювали такі особистості як О. А. Іллюшин, А.О. Володін, Ю.М. Работнов та ін. У той час ще був певний набір класичних задач, які породжували, навіть, задрість. Настільки все красиво було зроблено. Однією з таких задач була задача, розв'язана В.І. Моссаковським. Це контактна задача. Дуже яскраве, красиве розв'язання цієї задачі. І мені здається, що ця обставина справила враження і на Вадима. Тому контактні задачі, задачі контактної взаємодії, хоча вже і прочитані, з практичної точки зору потреб ДКБ «Південне», де, до речі, Вадим працював після закінчення університету, пов'язані з потребами його внутрішнього світу як механіка. Коли він вважав, що та чи інша задача цікава з точки зору розвитку механіки, обговорення цих задач завжди було дуже для мене цікавим. Особливо цікавим є у цих задачах проблема контактної взаємодії оболонок з різними ребрами, з підкріпленнями. Я пам'ятаю надзвичайно цікаву дискусію про те, чи є відставання, чи нема відставання. Це відбувалось на різних конференціях, і кожний намагався якісь експеримент продемонструвати, оскільки у рамках теорії оболонок нема таких рівнянь, які використовувались для них. Така ситуація була дуже цікава: з'ясувати, чи виникають там зосереджені сили на кінцях інтервалу. Обговорення цих проблем з Вадимом було дуже цікавим і змістовним.

Мені здається, що я і сам маю таку можливість сказати, що якимось так склалося життя, що завжди знаходиться момент, коли для себе вирішував: все, досить; це коло проблем більш-менш вже зрозумів, що треба зайнятися чимось новим. У цьому розумінні Вадим був людиною динамічною. Особливо сильно він захопився останнім часом системами антенно-хвильової техніки та сонячної енергетики. Я пам'ятаю, що на конференції у Львові ми з ним провели пару годин за дискусією. Він мені розповідав про свої здобутки у цьому напрямку, які він досяг з точки зору обробки поверхні, гладкості її обробки.

Чим цікава наука? Наскільки вірною є теза, що наукою неможна займатися тільки у робочий час. Якщо ви почали нею займатися, то наука повністю поглинає ваше життя. У цьому розумінні, коли згадуємо Вадима, це був істинний вчений, який завжди, у кожен момент був налаштованим на те, щоб обговорити якісь новий результат, поговорити про постановку нової проблеми.

Надзвичайно довге спілкування з Вадимом Гудрамовичем надало мені, як я сподіваюсь, досить глибоке розуміння його особистості. З моєї точки зору, згадуючи Вадима сьогодні, відчуваємо певну емоційну теплоту.

ПАМ'ЯТІ МОГО ВЧИТЕЛЯ, ПРОФЕСОРА В.С. ГУДРАМОВИЧА

Е.Л. Гарт

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Сьогодні ми вшановуємо пам'ять видатного вченого-механіка, друга, товариша, Вчителя, для багатьох із нас – це дорога людина, член-кореспондент НАН України, Вадим Сергійович Гудрамович. Скоро буде рік, як пішов з життя Вадим Сергійович Гудрамович (06.07.1936–12.05.2023). Людина-легенда, людина-епоха... Людина харизматична, неординарна, яскрава... Вадим Сергійович був інтелігентною, ерудованою, щирою і глибоко порядною людиною, енциклопедичних знань. Це була Людина з великої літери, з великою душею і великим серцем.

До останніх днів свого життя Вадим Сергійович активно працював, до речі, над статтею до вшанування пам'яті з нагоди 145-річчя Степана Прокоповича Тимошенка. До таких подій Вадим Сергійович завжди ставився з особливою увагою і пошаною. Залишились незакінченими його рукописи, обірвані рядки останньої в його житті статті, написані його убористим почерком... Він не мислив свого життя без праці, без її Величності Науки, якій вірою і правдою служив усе своє життя.

Вадим Сергійович завжди допомагав своїм учням і колегам: будь то дружня порада в обговоренні наукових питань, або вирішення життєвих проблем. Він завжди ставився до будь-яких питань із душею. У моєму становленні, як вченої, Вадим Сергійович відіграв ключову роль. За це я йому безмежно вдячна, і буду пам'ятати усе своє життя його особливе ставлення до мене. Спілкування з цією неординарною, харизматичною особистістю завжди було цікавим, іноді навіть зворушливим... Пройшов майже рік, як Вадима Сергійовича немає серед нас, але дуже часто спливають спогади... Багато спільних подорожей, участь у багатьох наукових конференціях, багато спільних публікацій, обговорення нових ідей, іноді дуже гарячі, емоційні дискусії, але все це на благо істини, науки.

Вадим Сергійович завжди приділяв велику увагу підготовці наукових кадрів вищої кваліфікації, будучи яскравим і талановитим представником школи механіки, створеної академіком В.І. Моссаковським (був першим аспірантом Володимира Івановича, послідовником його ідей). Під керівництвом чл.-кор. НАН України, професора В.С. Гудрамовича захищено 15 кандидатів і 4 доктори наук. Мені пощастило бути ученицею Вадима Сергійовича, однією із чотирьох підготовлених ним докторів наук.

Вадим Сергійович прожив довге, насичене, яскраве життя. У нього було багато різноманітних захоплень: класична музика і джаз, шахи і заняття спортом, література, особливо, поезія, живопис і мистецтво, фотографування (на мій погляд, без перебільшення, на рівні фотохудожника), подорожі, спілкування з цікавими людьми й заняття наукою. Це ще далеко не весь спектр його інтересів. Слід особливо відмітити, що для Вадима Сергійовича такі поняття як чесність, доброчесність, порядність були завжди на першому місці. Він ніколи не боявся висловлювати свої думки і відстоювати свої погляди й переконання. У нього, як писав класик: «У людини має бути все

прекрасно: і обличчя, і одяг, і душа, і думки». Таким був Вадим Сергійович. Таким ми його запам'ятали.

Мною написана стаття, присвячена пам'яті Вадима Сергійовича Гудрамовича [6]. Бібліографічна інформація про В.С. Гудрамовича, зокрема, міститься у [1–9].

Одна із улюблених фраз, яку Вадим Сергійович часто повторював: *"Поспішайте робити людям добро"*, залишається нам як його завіт. Як його особисте правило життя.

Масштаб такої особистості важко собі уявити. Наука, якій Вадим Сергійович був нескінченно відданий до останнього подиху, і усі ми, хто його добре знав, зазнали непоправної втрати. Світла пам'ять про Вадима Сергійовича Гудрамовича назавжди залишиться у наших серцях...

Література

1. Відділення механіки НАН України. Історико-біографічний довідник. – К.: Академперіодика, 2015. – 343 с. – С. 173–174.
2. Вісник НАН України. – 2006. – №7. – С. 60–61. <https://visnyk-nanu.org.ua/ojs/index.php/v/article/view/3577/3595>
3. Вісник ДНУ. Сер. Механіка. – 2011. – Вип. 15. – Т. 2. – 280 с. – С. 3–4.
4. Енциклопедія сучасної України. Т. 6: «Го» – «Гю». – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2006. – 712 с. – С. 590–591. <https://esu.com.ua/volume-6&pn=69> ; <https://esu.com.ua/article-24500>
5. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – 2023. – Вип. 36. – 148 с. – С. 142–144. <https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/579/577>
6. Професори ДНУ: Біобібліограф. Довідник. – Д. : Вид-во ДНУ, 2008. – 596 с. – С. 117–119. <https://www.dnu.dp.ua/docs/dnu/profesorisdnu.pdf>
7. Славне сузір'я окриленх Університетом. – Д.: Вид-во ДНУ, 2008. – 400 с. – С. 70–74.
8. Творці української науки. Сер. Технічні науки. – К. : Вид-во «Анавіт», 2021. – 152 с. – Т. 2. Розділ 3. Машинознавство та механіка. – С. 93–98.
9. Хто є хто в Україні. – К.: УАНПП «Фенікс», 2000. – С. 116.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ У ТІЛАХ З БАГАТОШАРОВИМИ ПОКРИТТЯМИ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНИХ ОБМЕЖУВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

Р. М. Кушнір, Ю. В. Токовий

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача
НАН України*

Створення й удосконалення елементів нової техніки та пов'язані з цим розробка і запровадження новітніх технологій виготовлення матеріалів з покращеними властивостями потребують виконання комплексних фундаментальних досліджень щодо вивчення термомеханічних процесів в багатокомпонентних тілах за комплексних термосилових навантажень з урахуванням широкого спектру експлуатаційних та конструкційних факторів, зокрема, анізотропії, неоднорідності та термочутливості матеріалів, а також взаємодії конструктивних елементів різної геометрії. **Значною мірою** це стосується розвитку технологій створення функціонально-градієнтних

матеріалів з контрольованими на етапі виготовлення профілями розподілів фазових компонент в межах виробу, які можуть мати регульовану теплопровідність, термодформативність і термоміцність в екстремальних умовах експлуатації, що є вкрай важливим для створення елементів електронної та космічної техніки, гіперзвукової авіації, захисних систем ядерної і хімічної енергетики, технічного устаткування широкого призначення. Тому проблема встановлення оптимальних за цільовими показниками критеріїв для виготовлення функціональних матеріалів з метою забезпечення потрібних експлуатаційних показників елементів сучасної техніки, приладів та конструкцій набуває визначальної важливості.

Розвиток методів дослідження термомеханічної поведінки неоднорідних тіл та тіл з покриттями пов'язаний зі значними труднощами, що викликані насамперед потребою розв'язання ключових диференціальних рівнянь відповідних задач термомеханіки зі змінними коефіцієнтами. Відомі на сьогодні методи не можуть задовольнити сучасні потреби у даній галузі, основною з яких є визначення оптимального розподілу характеристик матеріалів для забезпечення тих чи інших функціональних показників конструкції в цілому, а також оптимальне керування їх термонапруженим станом. З цієї точки зору визначення термонапруженого стану не є кінцевою метою досліджень, а лише проміжним етапом, який повинен надати для подальшого застосування зручний для аналізу аналітичний розв'язок прямої задачі, що точно задовольняє заданим умовам, базовим принципам та моделям механіки деформівного твердого тіла і має форму явної функціональної залежності від факторів навантаження та характеристик матеріалу.

У доповіді наведено підхід до побудови розв'язків плоских задач термопружності для неоднорідних багатопарових тіл. За допомогою безпосереднього інтегрування рівнянь рівноваги встановлено співвідношення між компонентами тензора напружень, з використанням яких рівняння суцільності в напруженнях зведено до ключових рівнянь для визначальних компонент напружень. У той же спосіб крайові умови, задані на межі тіла для відповідних компонент тензора напружень, зведені до системи крайових та інтегральних умов для визначальних напружень. Із застосуванням відповідного інтегрального перетворення, отримані ключові рівняння зводяться до інтегральних рівнянь Вольтерри, для розв'язання яких застосовується метод резольвентних ядер.

Роботу виконано за часткової фінансової підтримки за спільним Українсько-Польським науково-дослідним проектом «Ідентифікація термомеханічних параметрів неоднорідних композитних матеріалів та захисних покриттів» у 2023 – 2024 рр.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ МЕТОДІВ І НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

В.П.Пошивалов, Ю.Ф. Данієв

Інститут технічної механіки НАН України и ДКА України

При оцінці залишкового ресурсу технічних об'єктів використовуються різні математичні методи, а саме імовірнісні, параметричні, кореляційний та регресійний аналіз, факторний аналіз, байєсовські мережі, за несучою здатністю, експертні, із

застосуванням кінетичної теорії міцності твердих тіл, за швидкістю корозії, за циклічним навантаженням тощо [1].

Методи експертних оцінок, засновані на знаннях фахівців та накопиченому ними досвіді є важливим інструментом визначення загальних тенденцій розвитку параметрів та технічного рівня складних технічних систем.

У роботі проведено порівняльний аналіз використання експертної системи, що базується на базі знань, з експертною системою, що базується на нейронній мережі, для визначення залишкового ресурсу технічних об'єктів. Для побудови залежності між вхідними параметрами та залишковим ресурсом пропонується використовувати експертні методи та нейронні мережі (НМ) [2]. При цьому дані, які використовуються для оцінки залишкового ресурсу, можуть базуватися як на експертних оцінках, так і бути отримані в результаті технічного діагностування технічного об'єкта.

Застосування нейронної мережі для оцінки залишкового ресурсу забезпечує такі її властивості:

- здатність до узагальнення різномірних даних, які впливають на стан несучої здатності конструкції об'єкта;
- нейронна мережа, побудована із сполук нелінійних нейронів, сама є нелінійною (нелінійність є важливою властивістю, оскільки вхідний сигнал, що подається в НМ, у разі визначення залишкового ресурсу є також нелінійним);
- відображення вхідної інформації у вихідну.

Задача визначення залишкового ресурсу за даними вимірів та експертних оцінок може бути сформульована як задача апроксимації функції багатьох змінних. Ці змінні є вхідними параметрами для побудови нейронної мережі. Змінні включають дані отримані при проведенні технічного діагностування в процесі експлуатації (перевищення параметрів, зміна середовища, динамічні навантаження) і зовнішніми факторами. Далі будується деяке відображення таким чином, щоб на кожен можливий вхідний образ, формується вихідний, який характеризує залишковий ресурс технічного об'єкта. В роботі також показано, що підвищувати надійність технічних об'єктів можна при використанні комп'ютерних технологій, зокрема, інтелектуальних систем.

1. Пошивалов В.П. О методологии прогнозирования ресурса конструкций на этапе проектирования с использованием вероятностных подходов / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниев, Л. В. Резниченко, И. И. Телегина / Математичні проблеми технічної механіки – 2018 : Межд. наук. конф., квітень, 2018, Дніпро, Україна : мат. конф. – Київ, Черкаси, Кам'янське, 2018. – С. 31.

2.Kriesel D. A brief introduction to Neural Networks [Электронный ресурс], 2007. 286 p. [http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks].

МЕТОДОЛОГІЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

А. П. Дзюба^{1,2}, В. М. Сіренко²

¹*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

²*ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»*

Подана робота направлена на розробку методології забезпечення достовірності результатів розрахунку міцності та прогнозування несучої здатності неоднорідних

оболонкових конструкцій сучасного машинобудування, зокрема елементів ракетно-космічної техніки, баків, сухих відсіків ракет-носіїв та ін. Актуальність вирішення цієї проблема обумовлена наявністю певної розбіжності результатів розрахунку та даних відповідних руйнівних випробувань реальних об'єктів.

У зв'язку з цим, на завершальній стадії розробки складних конструкцій перевірка достовірності розрахункових параметрів міцнісної надійності здійснюється шляхом проведення досить високовартісних руйнуючих натурних випробувань створюваних фрагментів і (або) усієї конструкції, або введенням завищених коефіцієнтів запасу міцності. Це суттєво підвищує витрати матеріалу та вартість розробки таких виробів і знижує їх конкурентоздатність на ринку послуг ракетно-космічної техніки.

Слід звернути увагу, що вхідні дані для числового аналізу приймаються у відповідності з проектними. Реальні ж їх значення після виготовлення конструкції (геометричні розміри, значення фізико-механічних характеристик, параметри зовнішніх навантажень, умови закріплення та ін.), можуть мати певні відхилення від прийнятих в розрахунках. Ці дані встановлюються вимірюванням на вже виготовленій натурній конструкції.

Контроль впливу відхилень вхідних розрахункових і реально існуючих параметрів здійснюється в роботі шляхом системного інтерактивного комп'ютерного моделювання із залученням методів теорії чутливості для оцінки залежності результатів розрахунку від зміни вхідних параметрів та проведення порівняльного аналізу з даними паралельного неруйнівного випробування реального об'єкта (в пружній області) з використанням засобів вимірювання деформацій та напружень або методів голографічної інтерферометрії.

При досягненні гранично припустимих значень параметрів пружного неруйнівного деформування, навантаження на реальну конструкцію зупиняється і далі проводиться порівняння напружень, обчислених за декількома вибраними критеріями в найбільш небезпечних (де і встановлюються вимірювальні пристрої) точках. За цими результатами обирається критерій з найбільш близькими до даних неруйнівних випробувань показниками.

За наявності неприпустимих відхилень результатів розрахунку і неруйнівних випробувань, проводиться виявлення причин неточностей в розрахунку та внесення відповідних коректив до значень вхідних параметрів та відповідного числового моделювання напружено-деформованого стану конструкцій.

За межами пружності (при нелінійному моделюванні) подальше досягнення критичного стану і віртуального руйнування проводиться лише у вигляді комп'ютерного моделювання.

Таким чином, в роботі побудована методика моделювання впливу можливих відхилень вхідних даних від своїх номінальних значень на відхилення основних параметрів результатів обчислень.

Застосування підходу дозволяє встановити контроль за величиною накопиченої похибки у вигляді кількісних показників відхилень (розкиду) результатів розрахунку від технологічних відхилень вхідних даних та визначити їх граничні допуски, зокрема, і тих, які вносяться в конструкцію при її виготовленні, і, як наслідок, в розрахунках не враховані.

Результати досліджень можуть бути використані для внесення коректив у проектні та розрахункові дані для підвищення достовірності результатів розрахунку несучої здатності з метою відмови від проведення або для зменшення обсягу високовартісних руйнівних випробувань.

STRUCTURAL AND RESIDUAL STRESS STATE OF STEEL PLATES SUBJECTED TO THE HEATING OF MOVING HEAT SOURCES

¹ Hachkevych O.R., ¹ Kozakevych T.V., ² Wolczanski T.

¹ *Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NAS of Ukraine (Ukraine),*

² *Opole University of Technology (Poland)*

A variant of method for definition and optimization of residual phase distribution and stress state of thin plates made of low carbon low alloy steels, subjected to local heating by moving distributed heat sources (with several localization centers) to temperatures of complete austenization of the steel in the heat-affected zone and subsequent monotonic cooling, is proposed. The technique based on the well-known model describing the phase composition and the residual stresses caused by it in low-carbon low-alloy steel solids during their monotonic cooling (from a high-temperature initial state with a complete austenization zone) adapted to the class of considered problems.

A method of parametric optimization of the characteristics of moving distributed heat sources (with one and several centers of localization) relative to the percentage of martensite (according to the criterion of the minimum of the maximum content of martensite) while reducing the level of residual stresses has been developed.

ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ШТАНГИ АНКЕРА З ФІКСУЮЧОЮ СУМІШЮ

О.П. Круковський, Г.І. Ларіонов, Ю.В. Земляна

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

Анкерне кріплення підземних споруд стає дедалі поширеним та сучасним видом кріплення. Цьому сприяє низька собівартість на низька металоємність. Сучасні методи розрахунку систем анкерного кріплення базуються на широкому застосуванні методів моделювання. Математичне моделювання (ММ) вигідно відрізняється серед них своєю зручністю та доступністю, завдяки широкому розповсюдженню комп'ютерних систем. Проте основною складовою ММ є вибір математичної моделі. Найбільшого поширення набули чисельні методи засновані на методі скінчених елементів (МСЕ). Добре розроблений інтерфейс сучасних пакетів заснованих на МСЕ методах сприяє їх широкому розповсюдженню. Проте аналіз отриманих масивів чисельних даних має свої особливості. Так графічне зображення залежності параметрів напружено деформованого стану у околі виробки від конструктивних параметрів кріплення обмежений дво та трьох вимірними зображеннями. Наочність таких зображень дозволяє виконувати та використовувати його для рекомендацій та висновків стосовно проектів кріплення. Оскільки множина таких параметрів може бути значною, то і процедура аналізу важливості впливу на напружено деформований стан у околі закріпленої виробки не є простою. А якщо знайти таку ММ яка би була більш простою

і дозволяла отримувати розв'язки не чисельними процедурами, а отримувати їх у вигляді аналітичних формул.

Виявилось, що узагальнена задача М.Є Жуковського не тільки відповідає процесам і умовам роботи металополімерного анкера зафіксованому у гірську породу, але й дозволяє отримувати аналітичний зв'язок між параметрами напружено деформованого стану та конструктивними його параметрами. ММ яка покладена в основу цієї задачі і має аналітичний розв'язок полягає у схожості взаємодії металополімерного анкера з гірською породою до взаємодії анкера через проміжну втулку з навколишнім середовищем. Модифікація цієї моделі до потреб математичного моделювання та розрахунку кріплення гірничої виробки металополімерними анкерами дозволила з успіхом використовувати її для практичних потреб.

Проте при детальному вивченні моделі з'ясувалась необхідність врахування особливостей взаємодії на контактах в системі «анкерна штанга – фіксуєча суміш – гірська порода». До тепер у якості коефіцієнтів пропорційності у виразах переміщень від сил, які діють на фіксуєчу суміш як від гвинтоподібних виступів на анкерній штанзі, так і на контакті з гірською породою приймалися переміщення на вказаних контактах від розтягу. Проте поглиблений аналіз взаємодії фіксуєчої суміші з анкерною штангою дозволив врахувати більш складний механізм їх визначення. До причин такого рішення призвів аналіз величин переміщень, які отримувала анкерна штанга за висмикування її з гірського масиву. Так переміщення за проведеними експериментами виявились значно більшими пружних зміщень.

Тому, враховуючи незначну товщину шару фіксуєчої суміші запропоновано для визначення коефіцієнтів контактної взаємодії враховувати не лише процес деформації від дії сил розтягу та перерізуєчих сил, але й врахувати в'язко пружні процеси, що протікають за деформації високомолекулярного матеріалу фіксуєчої суміші.

Порівняння результатів розподілення сил взаємодії в системі «анкерна штанга – фіксуєча суміш – гірська порода» отриманих за запропонованою моделлю та отриманих МСЕ методом показало незначну різницю результатів, що дозволило зробити висновок про правильність вказаного підходу.

SIMULATION OF THERMOPLASTIC BEHAVIOR OF ELEMENTS OF STRUCTURES DEPENDING ON THE FUNCTIONAL STATE OF THE MATERIAL STRUCTURE

P.O. Steblyanko

S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine

The fundamental problem, the solution of which is aimed at the report, consists in a comprehensive study and guaranteeing the strength of the elements of machine-building structures operating under conditions of significant electromagnetic, thermal and power loads. A specific fundamental task within the framework of the general problem, the solution of which is envisaged in the project, is related to the creation of a coordinated system of methods of increased accuracy for researching the thermal strength of structural elements made of new functionally heterogeneous composite materials based on taking into account electromagnetic, thermal and micromechanical effects.

ЗАСТОСУВАННЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИКИ ВІЛЬНОГО ОБЕРТАННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА НАВКОЛО НЕРУХОМОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ОСІ

І.В. Добров, А.В. Сьомічев, О.М. Павленко

*Мелітопольський державний педагогічний університет ім. Богдана Хмельницького,
Український державний університет науки і технологій*

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження рівномірного вільного обертання твердого симетричного тіла в горизонтальній площині навколо нерухомої вертикальної осі, яка зміщена відносно центру мас твердого тіла.

Теоретичні дослідження базуються на структурному аналізі двох механізмів. Перший механізм забезпечує умови для вільного обертання твердого тіла у вигляді диска, з'єднаного з горизонтальним стрижнем за допомогою шарніру, а сам горизонтальний стрижень є одним цілим з вертикальним валом, який за допомогою шарніру з'єднаний з нерухомою горизонтальною основою і ступень вільності (w) диску щодо нерухомої основи складає

$$w = 3 \cdot n - 2 \cdot p_1 = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 2, \quad (1)$$

де n - число рухомих ланок механізму; p_1 - число пар першого роду, до яких належать два кінематичних шарніру.

З формули (1) слідує, що вільний диск має можливість здійснювати у горизонтальній площині при будь-якому обертанні вертикального валу два незалежних рухи відносно нерухомої основи, до яких можливо віднести обертання центру мас диска навколо нерухомої основи з кутовою швидкістю вертикального валу, а також обертання диску навколо свого центру мас.

Другий механізм у вигляді однієї ланки (нерухомо з'єднаних один з одним вертикальний вал, горизонтальний стрижень і диск) та однієї кінематичної пари першого роду (шарніру)

між вертикальним валом та нерухомою горизонтальною основою забезпечує ступень вільності диску

$$w = 3 \cdot n - 2 \cdot p_1 = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 1. \quad (2)$$

З (2) слідує, що нерухомий відносно горизонтального стрижня диск має тільки одну можливість руху відносно нерухомої основи, а саме обертання з кутовою швидкістю обертання вертикального валу.

Експериментальні дослідження базуються на використанні цифрової кінокамери, яка розташована зверху осі обертання вертикального валу і здійснює кінозйомку процесу обертання двох дисків на горизонтальному стрижні, закріпленому нерухомо відносно вертикального валу, коли один з цих дисків нерухомо закріплений на горизонтальному стрижні, а інший має можливість вільно обертатися відносно горизонтального стрижня. Використання будь якого монітору сучасних комп'ютерів дозволяє відтворювати результати кінозйомки в режимі он-лайн, або у уповільненому трансляванні результатів кінозйомки з використання її зупинки в бідь-який момент обертання вертикального валу для порівняння результатів обертання як нерухомого, так і вільно встановлених дисків на горизонтальному стрижні. Отримані результати

експериментальних досліджень підтверджують результати виконаних теоретичних досліджень.

ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФІЛЯ КРИЛА З УРАХУВАННЯМ ЕКРАННОГО ЕФЕКТУ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дреус¹ А.Ю., Сохацький² А.В., Ємець¹ М.В.

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

²Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна

Тенденції розвитку сучасних транспортних систем свідчать про стрімке зростання безпілотних апаратів і технологій. Події у війні, яку розв'язала росія проти України, показали безальтернативність впровадження безпілотних технологій в умовах сучасного бою. У Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара в рамках науково-дослідного проекту, що фінансується Національним фондом досліджень України, розробляється концепт високошвидкісного надводного літального апарату з екранним ефектом. Особливості призначення такого апарата накладають певні умови на аеродинамічні характеристики. У представленій роботі узагальнено відомі результати з дослідження аеродинаміки профілю крила, що рухається поблизу водної поверхні. Слід зазначити, що особливу увагу викликає задача польоту над профільованою поверхнею, оскільки в цьому випадку виникають проблеми забезпечення стійкості руху транспортного апарату, як в поздовжньому так і в поперечному каналах.

Проведений огляд експериментальних підходів до моделювання аеродинаміки наземних транспортних апаратів типу екраноплан вказує на необхідність подальшої розробки методів для забезпечення кінематичної та динамічної подібності фізичних процесів. На сьогодні відомі експериментальні методи в аеродинамічних трубах не задовольняють адекватної подібності фізичних процесів моделі та реальному русі. Попередні дослідження в цьому напрямі проводились без урахування динаміки руху водної поверхні та її властивостей.

Моделювання турбулентних рухів повітряних мас є фундаментальною проблемою як теоретичної фізики так і практичної аеродинаміки. Відсутність універсальної теорії опису турбулентних течій створює проблеми з визначенням аеродинамічних навантажень. Це питання є одним із ключових моментів при проектуванні високошвидкісних транспортних засобів, оскільки при високих швидкостях руху тільки на подолання опору повітря може припадати до 90% загальних енергетичних витрат. Таким чином необхідні фундаментальні дослідження в аеродинаміці високошвидкісного транспорту.

Основною складністю при використанні числових методів для визначення аеродинамічних характеристик різного роду тіл, в тім числі транспортних засобів є проблема опису турбулентності, як фізичного явища. Сучасні комп'ютери дозволяють застосовувати певні моделі турбулентності для розрахунку процесів аеродинаміки літальних апаратів. Проте, використання складних моделей типу DNS, LES, RANS не завжди може бути коректним, особливо на початкових етапах досліджень. Відсутність універсальних моделей турбулентності та потреба в значних обчислювальних ресурсах обмежують використання сучасних моделей аеродинаміки на основі в'язкої рідини.

Застосування моделей ідеальної рідини для розробки методів дослідження аеродинамічних процесів значно спрощує задачу.

Взагалі, як чисельне, так і експериментальне коректне моделювання аеродинамічних процесів під час руху крила поблизу поверхні є доволі складним завданням з огляду на фізичні особливості процесу. Методи розрахунків обтікання тіл на основі моделі ідеальної рідини набули значного поширення в обчислювальній аеродинаміці завдяки своїй простоті та невеликим вимогам до ресурсів ЕОМ. Серед методів на основі моделі ідеальної рідини слід виділити методи дискретних особливостей, а саме метод дискретних вихорів (МДВ). Він порівняно простіший від числових методів, які базуються на моделях турбулентних течій, не надто трудомісткий, зручний для застосування ЕОМ і є досить ефективним способом математичного моделювання обтікання тіл потоком повітря. Тому для розв'язання задач аеродинаміки екранопланів та динаміки їхнього руху цей метод може бути надзвичайно ефективним. У роботі представлено математичну модель і методику розрахунку, на основі МДВ, що дає змогу визначити величину підйімальної сили, зокрема поблизу екрану.

Як тестову задачу розраховано обтікання крилового профілю Clark-YH з відносною товщиною 12% потоком нестисливої незв'язної рідини. Результати тестових розрахунків показали хорошу збіжність із відомими експериментальними даними. Отже, метод дискретних вихорів пропонується для моделювання та визначення аеродинамічних характеристик під час польоту над хвилястою поверхнею, що є актуальним завданням у контексті розробки надводних безпілотних апаратів. Слід зазначити, що саме режими обтікання профілю крила над водною поверхнею різного профілю є маловивченою задачею в теорії польоту екранопланів.

Роботу виконано в рамках проекту «Обґрунтування аеродинамічних і проектних параметрів високошвидкісного надводного безпілотного апарата» за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 179/0170)

XXIV МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

“МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2024”

Частина 1



Доповіді секцій: *Механіка деформівного твердого тіла та механіка рідини, газу та плазми (18-19 квітня 2024)*

ЗМІСТ

1.(54) П.О. Стеблянко Міжнародна наукова конференція МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ (2001-2024)	24
2(4) О.М. Гузь, О.П. Жук, О.М. Багно СПІВВІДНОШЕННЯ АКУСТОПРУЖНОСТІ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ	25
3(1) М.О. Бабешко, В.Г. Савченко ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПУЩЕННЯ ІЗОТРОПНОГО МАТЕРІАЛУ В ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ПРОСТОРОВИХ ТА ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ	32
4(3) О.Д.Петров, Ю.А.Черняков, П.О.Стеблянко ВИГІН ТРИВИМІРНОГО БРУСА ПРИ НАЯВНОСТІ ВЕЛИКИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ	33
5(5) О.З. Галішин, С.М. Склепус НЕЛІНІЙНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ГНУЧКИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ ФОРМИ ІЗ МАТЕРІАЛІВ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ЩО ЗАЛЕЖАТЬ ВІД ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ	36
6(91) Т.В.Ходанен, Н.В.Шевельова ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ТРИЩИН НА МЕЖІ ПОДІЛУ МАГНІТОЕЛЕКТРОПРУЖНИХ ПІВПРОСТОРІВ	37
7(7) Л.І.Книш, Д.В. Захаров КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ	38
8(8) Н.В.Сметанкіна, С.Ю. Місюра, Є.Ю. Місюра АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ БАГАТОФАКТОРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	39
9(9) Ю. П. Глухов ШАРУВАТА ОСНОВА З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ ДІЇ РУХОМОГО НАВАНТАЖЕННЯ	41
10(10) А. Ю. Глухов, Ю. П. Глухов ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ ВЗДОВЖ ШАРІВ КОМПОЗИТНОГО СТИСЛИВОГО МАТЕРІАЛУ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ	42
11(12) О.М.Горечко, Н.О.Заводовська ВЛАСНІ ЧАСТОТИ НАГРІТОЇ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНКИ З ПРУЖНИМ ЩОДО ПОВОРОТУ КРАЄМ	43
12(85) Ю.С. Тарасенко АКТИВНО-ПАСИВНИЙ ВПЛИВ НА ДЕМАСКУЮЧІ ОЗНАКИ ДРОНІВ	44
13(14) В.П. Пошивалов, Ю.Ф. Данієв ПРО ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	46
14(15) А.В. Сохацький МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ В ЧИСЛОВИХ МЕТОДАХ З ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	47
15(16) Е. Л. Гарт, Б. І. Терьохін ВПЛИВ ВКЛЮЧЕННЯ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ З ПРЯМОКУТНИМ ОТВОРОМ	49
16(17) Е. Л. Гарт, О. Д. Шебанов ПРО КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО КРУГОВОГО ОТВОРУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ ЗА НАЯВНОСТІ ОТОЧУЮЧИХ ЙОГО ЕЛІПТИЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ	51
17(18) Ю.М. Кононов МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРТАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ З ОПОРОМ ПРУЖНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА З ПОРОЖНИНАМИ, ЯКІ МІСТЯТЬ РІДИНУ, У ВИГЛЯДІ СИСТЕМИ ДВУХ І ТРЕХ ПРУЖНО ЗВ'ЯЗАНИХ ТВЕРДИХ ТІЛ З РІДИНОЮ	54

18(19) Є.М. Ірза ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВАЖЕНИХ ЗАЛИШКІВ ДО ЗАДАЧ ТЕРМООБРОБКИ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ ТІЛ	55
19(20) В.І. Ліповський ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ КОМПОЗИТНОГО КОМБІНОВАНОГО ТОРОВОГО БАКА	56
20(21) В. Ф. Молчанов, Д. В. Латишев ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ КРУГЛОМУ ШЛІФУВАННІ ДОДАТКОВИМ ЗМІЩЕННЯМ ОСІ	58
21(22) О.М. Давидчик, І.О. Карпенко ПРО НАБЛИЖЕННЯ ФУНКЦІЙ ЛІНІЙНИМИ ОПЕРАТОРАМИ	60
22(23) І.В. Янчевський, О.Х. Остос ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІДЕАЛЬНОЇ СТИСЛИВОЇ РІДИНИ, ЩО ЗБУДЖУЄТЬСЯ СФЕРИЧНИМ СЕГМЕНТОМ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ПОРОЖНИНІ	60
23(24) Ю.М. Кононов, О.В. Несмелова, Я.І. Святенко ПРО СТІЙКІСТЬ ОБЕРТАННЯ НА ПІДВІСІ ГІРОСКОПА ЛАГРАНЖА З ІДЕАЛЬНОЮ РІДИНОЮ	61
24(87) Р.Р. Воєділо, В.В. Лобода ДОСЛІДЖЕННЯ БІМАТЕРІАЛЬНОЇ ОБЛАСТІ З ТРІЩИНАМИ МІЖ ДВОМА МАТЕРІАЛАМИ	63
25(26) В.В. Круковська, О.П. Круковський ЗМІНА ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ У ВИБОЇ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ ВУГІЛЛЯ	64
26(27) О.П. Круковський, В.В. Круковська ЗАСТОСУВАННЯ СТАЛЕВИХ ТА ІН'ЄКЦІЙНИХ АНКЕРІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК В СКЛАДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ	66
27(28) В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко ПРО ВПЛИВ ЗМІНИ ПЕРЕРІЗУЮЧОЇ СИЛИ ВЗДОВЖ КОНТУРА ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ НА РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ В СФЕРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ	67
28(29) K. Panin TORSION, BENDING AND TENSION OF AN ELASTIC-PLASTIC ROD	68
29(30) Д.Д. Лещенко, Т.О. Козаченко ЕВОЛЮЦІЯ РУХУ ДИНАМІЧНО СИМЕТРИЧНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА З В'ЯЗКОЮ РІДИНОЮ ПІД ДІЄЮ ПОСТІЙНОГО МОМЕНТУ	69
30(109) О. А. Дзюба, В. В. Гудзь ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ, РОЗТЯГНУТОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНКИ З ОТВОРОМ	70
31(32) В.С. Ушакова, О.В. Ушаков ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МІНІМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛУ В ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯДЕР СПАДКОВСТІ В ЛІНІЙНІЙ ТЕОРІЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ	71
32(33) О.Л. Кіпніс СТІЙКІСТЬ МЕЖІ ПОДІЛУ СЕРЕДОВИЩ КУСКОВО-ОДНОРІДНОЇ ПІВПЛОЩИНИ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОЇ ПРИПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ	72
33(34) S.V.Kykot, K.G.Khoroshev, K.O.Duchenko ON A NOVEL ANALYTICAL METHOD IN KINEMATICS OF PLANAR MECHANISMS OF II CLASS BY ARTOBOLEVSKY	73
34(35) Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ДВОШАРОВОГО ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ТІЛА В УМОВАХ ПЛОСКОЇ ДЕФОРМАЦІЇ	74
35(36) О.Р. Гачкевич, О.Б. Гуменчук, А. Козярьська, Р.Ф. Терлецький МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЧАСТКОВО ПРОЗОРИХ ТІЛ З ПОРОЖНИНАМИ ЗА ТЕПЛОВОГО ОПРОМІНЕННЯ	77
36(37) П.Ю. Кобзар, А.Ю. Кобзар ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГРАФІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ У ТАБЛИЧНІ	77
37(38) І. Гергель ПРО СТІЙКІСТЬ БІМАТЕРІАЛЬНОГО ТІЛА З МІЖФАЗНИМ ДЕФЕКТОМ	80

38(40) О. Комаров ДОСЛІДЖЕННЯ РУХОМОЇ МІЖФАЗНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЬОВАНОЇ ТРИЩИННИ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ БІМАТЕРІАЛЬНОМУ ПРОСТОРІ	80
39(41) О.Р. Гачкевич, Т.В. Козакевич, Т. Волчанські МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕРМОМЕХАНІКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕВИХ ТІЛ ПРИ НАГРІВІ ЗА ВРАХУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ	81
40(42) А.В. Лисенко, Є.А. Сторожук ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ ПРУЖНОЇ ОСНОВИ І ТРИШАРОВОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕРІЗУ З РЕБРИСТИМ НАПОВНЮВАЧЕМ	83
41(43) Ю.Ю. Абросов, В.А.Максимюк ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМУВАННЯ ДОВГОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ СУПЕРКОЛОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ	85
42(44) В.І.Кузьменко, А.О.Молчанов ОБЕРНЕНІ КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПРУЖНОЇ ПІВПЛОЩИННИ	87
43(45) О.М. Клецков, В.В. Лобода АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОТРИЩИННИ ВЗДОВЖ ЖОРСТКО ЗАКРІПЛЕНОГО КРАЮ ТОНКОЇ НАКЛАДКИ	89
44(46) N.V. Zhogoleva, V.F. Shcherbak IDENTIFICATION OF MOMENTS OF INERTIA OF A RIGID BODY	90
45(47) В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко ПРО ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СФЕРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З ЕЛІПТИЧНИМ ОТВОРОМ	92
46(48) О.В. Піголь, В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко ДИСКРЕТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІПОТЕЗ КІРХГОФА–ЛЯВА В РОЗРАХУНКАХ НЕПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛІПТИЧНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ	93
47(49) Нуштаєва А. Ю., Шевельова А.Є. ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТАЕВРИСТИЧНОГО МЕТОДУ ГЕПАРДА ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	96

Міжнародна наукова конференція МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ (2001-2024)

П.О. Стеблянко

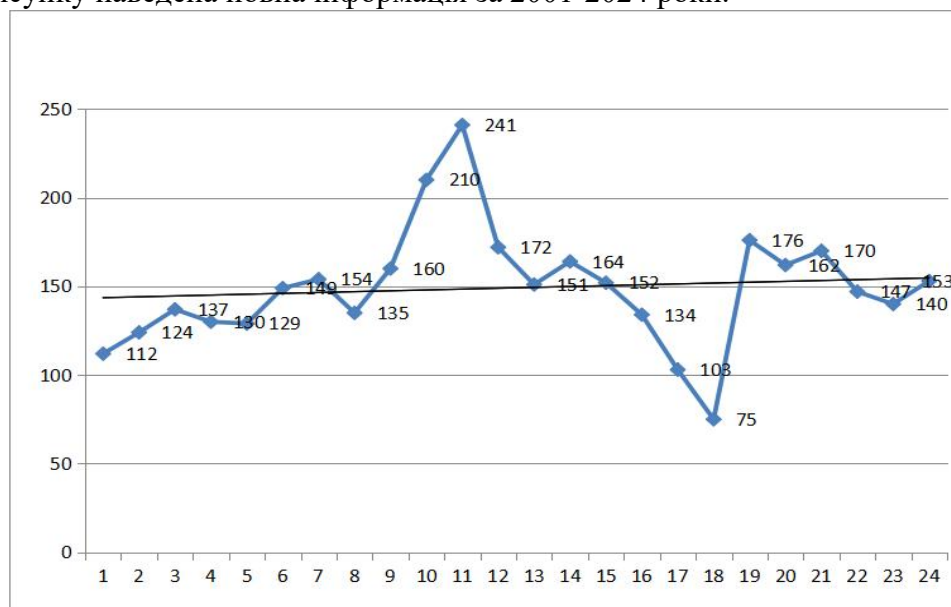
Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Наукова конференція **МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ** була започаткована у 2001 році. До 2004 року конференція мала статус Всеукраїнської наукової конференції, а з 2005 року вона проводиться, як Міжнародна наукова конференція. Основною метою проведення щорічної Міжнародної наукової конференції Математичні проблеми технічної механіки (МПТМ) є забезпечення можливості обміну науковою інформацією з проблем механіки й суміжних наук, навчання й підготовки кадрів, створення умов для більш повного розкриття можливостей фахівців-інженерів і вчених, які працюють в наукових установах, навчальних закладах і в промисловості, пропаганді досягнень учених та інженерів України, підтримці талановитої молоді, практичному використанню результатів нашої роботи в народному господарстві.

За ці роки (2001-2024 роки) зроблено більш ніж 3500 доповідей, в яких основними учасниками конференції МПТМ були науковці:

- Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України;
- Дніпропетровського національного університету ім. О.Гончара;
- Дніпровського державного технічного університету;
- Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України;
- Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України.

На рисунку наведена повна інформація за 2001-2024 роки.



Бажаю всім учасникам міжнародної наукової конференції **Математичні проблеми технічної механіки** натхненної та плідної праці і творчих успіхів.

СПІВВІДНОШЕННЯ АКУСТОПРУЖНОСТІ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ

О.М. Гузь, О.П. Жук, О.М. Багно

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Для безпечної експлуатації різних механізмів необхідний надійний контроль напруженого стану деталей конструкцій, який залежить не тільки від зовнішнього навантаження, але й від залишкових напружень, зумовлених технологічними процесами виготовлення елементів конструкції, їх монтажем, а також впливом силових і температурних полів різної природи. Залишкові напруження особливо небезпечні через наступні обставини:

- а) вони важко піддаються обчисленням;
- б) неможливо прогнозувати їх величину, знак і напрямок дії;
- в) вони додаються до напружень від зовнішнього навантаження.

У зв'язку із цим причиною аварій, що трапляються під час експлуатації машин і конструкцій, є не тільки напруження від зовнішнього навантаження, а й, значною мірою, залишкові напруження. Зазначені обставини вимагають наявності ефективного методу визначення напруженого стану елементів конструкції в реальних умовах їх експлуатації.

Удосконалення технології та розробка нових технологічних процесів створення конструкцій, що працюють в умовах високих силових та температурних полів, підвищення надійності та ресурсу їх експлуатації, інші особливості розвитку техніки вимагають нових експериментальних методів вимірювання напружень у твердих тілах, оскільки існуючі методи в деяких випадках непридатні. Так, зокрема, ці методи не можуть достатньо точно визначити залишкові напруження без повної або часткової руйнації моделі або самої конструкції. Знання залишкових напружень у багатьох випадках є необхідним для дослідження несучої здатності конструкцій. Розвиток загального рівня техніки та пов'язані з цим підвищені вимоги до методів контролю якості продукції викликали необхідність розробки нових методів дослідження металів, композиційних матеріалів та пластмас. Методи, що дозволяють вести контроль різних властивостей твердого тіла та службових характеристик різних вузлів і деталей, не порушуючи їх цілості та суцільності, отримали загальну назву неруйнівних. Ці методи поділяються залежно від виду енергії, що застосовується.

Проведемо огляд і виконаємо критичний аналіз існуючих методів для визначення найбільш сучасного та ефективного методу, який дозволяє визначати напруження в матеріалах і елементах конструкцій різної техніки. Найбільш широкого поширення набули такі методи дослідження та контролю, як рентгенівський, муару, теплового випромінювання, фотопружності, акустичної емісії, ультразвуковий та ін. Встановлення взаємного зв'язку деяких фізичних властивостей матеріалів з напруженнями в них призвело до розробки відповідних методів вимірювання напружень. До них належать методи фотопружності та фотопружних покриттів, крихких покриттів, муару, аналізу полів напружень з використанням теплового випромінювання, рентгенівський метод, комплексний експериментально-обчислювальний метод, метод акустичної емісії та ультразвуковий метод [3, 4], що

враховує сучасні результати наукових досліджень, отримані в цей час та представлені в роботах [1 – 7].

1. Метод фотопружності.

Задачу визначення напруженого стану складних конструкцій у багатьох випадках доводиться розв'язувати за допомогою експериментальних досліджень. Часто при проведенні експерименту використовують принцип подібності, відповідно до якого результати, отримані для однієї технічної системи, можуть бути використані для характеристики поведінки інших подібних систем. У таких випадках з метою одержання емпіричних залежностей або визначення різних характеристик натурної конструкції проводять експерименти на моделях у лабораторних умовах. Такий підхід застосовують і в методі фотопружності, а також у його різновиді у методі фотопружних покриттів. Для цього у методі використовується вплив напружень і деформацій на оптичні властивості матеріалу [3]. При цьому використовуються поляризовані промені світла. Відомо кілька способів одержання поляризованого світла від джерел природного (хаотично поляризованого) світла:

- 1) поляризація при відбитті;
- 2) поляризація при розсіюванні;
- 3) поляризація за допомогою поляроїдної плівки;
- 4) поляризація шляхом подвійного променезаломлення.

Фізичне явище тимчасового або штучного подвійного променезаломлення є основою метода фотопружності. Деякі прозорі аморфні матеріали, особливо полімерні, у звичайних умовах оптично ізотропні, але під дією навантаження стають подвійними променезаломлюючими (оптично анізотропними). Ці матеріали й використовують для виготовлення моделей елементів натурних конструкцій, напружений стан яких необхідно визначити. На практиці використовується закон, що пов'язує подвійне променезаломлення з різницею головних напружень. Але пропорційність оптичних і механічних величин, а також відсутність залежності від часу не узгоджується повністю з дійсною поведінкою багатьох матеріалів. При високих рівнях і великих градієнтах напружень ці ефекти можуть призвести до суттєвих похибок.

Крім зазначеного метод має ще такі обмеження:

- 1) дозволяє визначати лише різницю головних напружень;
- 2) вимагає чіткого формулювання певних співвідношень між параметрами моделі та натурної конструкції (використання законів моделювання).

2. Метод крихких покриттів.

Крихкі покриття, нанесені на поверхню деталі, використовуються для визначення зон високої концентрації напружень, а також для розміщення тензодатчиків. Цей метод використовується також для визначення напрямків головних деформацій розтягу. Необхідну для цього інформацію, отримують, аналізуючи особливості руйнування нанесеного на деталь крихкого покриття. На зовнішній поверхні покриття, де відсутнє навантаження, напруження по нормалі до поверхні дорівнює нулю. Ці напруження також дорівнюють нулю або близькі до нуля і у шарах, близьких до зовнішньої поверхні. Тому напружений стан покриття можна вважати плоским. У випадку ідеальної адгезії між покриттям і поверхнею деталі деформації покриття та деталі будуть однаковими, при цьому напрямки головних напружень у покритті та деталі збігатимуться.

Каніфольні крихкі покриття використовуються для встановлення зон високої концентрації напружень, а також для розміщення тензодатчиків. Вони

використовуються також для визначення напрямку головних деформацій розтягу. Крихкі керамічні покриття використовуються у випадках, коли каніфольні покриття не можна застосувати (наприклад, при тривалих випробуваннях, а також для здійснення контролю якості). Каніфольні крихкі покриття використовуються для встановлення зон високої концентрації напружень, а також для розміщення тензодатчиків. Вони використовуються також для визначення напрямку головних деформацій розтягу. Крихкі керамічні покриття використовуються у випадках, коли каніфольні покриття не можна застосувати (наприклад, при тривалих випробуваннях, а також для здійснення контролю якості).

Необхідно відзначити, що використання крихких покриттів для кількісного визначення поверхневих деформацій потребує спеціальної методики. Нехтування деякими операціями, такими, як підготовка поверхні деталі, призводить до втрати корисних даних і, що більш суттєво, до втрати достовірності отриманих результатів. Метод має обмеження, пов'язане з тим, що він може використовуватися лише для визначення поверхневих деформацій.

3. Метод муару.

Досить давно було виявлено, що для визначення величин переміщень можна використовувати інтерференцію між двома сімействами ліній. Така інтерференція отримала назву муару за аналогією з ефектом, що спостерігається на шовковій тканині, яка носить ту саму назву. Найбільш широко муар використовується для визначення переміщень і деформацій у площині досліджуваного зразка. Муар визначається як оптична картина темних і світлих смуг, які виникають у результаті накладення періодичних систем ліній (сіток). Таке явище називається інтерференцією. У методі використовують як геометричну, так і оптичну інтерференцію (геометричний і оптичний муар). Для отримання муарових картин використовують сітки прямих паралельних ліній з сталим кроком, а також сітки, утворені системами точок або концентричними колами та радіальними лініями. Муарові картини з'являються при накладенні відбитих зображень сіток, при накладенні сіток і їх тіней, при двократному фотографуванні й при безпосередньому накладенні сіток. Одна із сіток, яка накладається, повинна бути прозорою. Картини муарових смуг використовуються для вимірювання величин, що характеризують зміну геометрії тіла: переміщення, кути поворотів, кривизну і деформації. Муарові картини збільшують малі деформації ліній сіток і дають можливість виміряти ці деформації.

Метод муару має такі обмеження: використовується для визначення переміщень і деформацій у площині досліджуваного зразка.

Для надійного контролю технології виготовлення окремих деталей також потрібний метод визначення залишкових напружень у виробничих умовах. Вочевидь, найбільш сприятливими для цього є методи неруйнівного контролю напруженого стану елементів конструкцій.

4 Метод аналізу полів напружень з використанням теплового випромінювання.

Метод визначення напружень з використанням теплового випромінювання (SPATE) був розроблений для безконтактного вимірювання напружень. Метод оснований на вимірюванні малої зміни температури, обумовленої зміною напружень. Термопружний ефект, що призводить до зміни температури при деформуванні твердого тіла, аналогічний циклічному нагріванню – охолодженню газу в результаті періодичної зміни тиску. Зв'язок між приростом температури та приростом суми головних напружень був встановлений лордом Кельвіном. Реверсивна теорія пружності Кельвіна була розвинена Біо. На основі цієї теорії отримано рівняння

$$\Delta T = -K_{\text{ж}} T \Delta \sigma,$$

справедливе для всіх однорідних ізотропних матеріалів, навантажуваних адіабатично (щоб виключити тепловідведення необхідне циклічне навантаження зразка), у лінійній області деформування.

Метод має такі обмеження:

- 1) для забезпечення адіабатичності умов необхідне циклічне навантаження. Неможливо виміряти залишкові напруження, якщо матеріал знаходиться у нелінійному стані;
- 2) лінійність методу принципово обмежує його використання умовами пружності;
- 3) досліджувана поверхня має допускати можливість спостереження;
- 4) якщо температура поверхні значно змінюється, необхідні тарувальні поправки;
- 5) зміщення по нормалі до напрямку спостереження перекручують результати вимірювання напружень;
- 6) метод дозволяє визначити лише суму головних напружень.

5. Рентгенівський метод.

Рентгенівські промені, як і гама-, ультрафіолетові та інфрачервоні промені й мікрохвилі, належать до певної частини спектра електромагнітного випромінювання. Як і механічні хвилі, рентгенівські промені виявляють властивості інтерференції, відбиття та дифракції. Отже, короткі довжини хвиль цих променів ($\lambda \sim 10^{-4}$ мкм, $f \sim 10^{18}$ Гц; λ і f пов'язані рівністю $f \cdot \lambda = c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с) дозволяють їм проникати у тверді тіла, такі, як метали, які зазвичай непрозорі для видимого світла.

За допомогою рентгенівського методу, як і за допомогою інших методів, неможливі прямі вимірювання напружень, тому заміряють деформації. По деформаціях за допомогою визначальних співвідношень обчислюють напруження. У методі за основу виміру використовують міжатомну відстань (та її зміну) для певних площин кристалічних решіток.

Рентгенівський метод має роздільну здатність по напруженнях 20 – 35 Мпа. Це відповідає роздільній здатності близько 2 Мпа при вимірюванні деформацій на металах за допомогою тензодатчиків.

Рентгенівський метод використовується для вимірювання приповерхневих напружень на глибині 0,002 – 0,02 мм. Для визначення приповерхневих напружень і градієнтів напружень необхідно видаляти з поверхні шари матеріалу.

На результати вимірювання рентгенівським методом можуть впливати розміри зерен, глибина проникнення променя, точність визначення дифракційного кута θ , анізотропія та текстура матеріалу. Тому, незважаючи на більші можливості методу, його необхідно застосовувати з обережністю. Наприклад, при вимірюванні розподілу напружень по глибині для послідовного видалення шарів матеріалу може застосовуватися шліфування, але сама ця операція призводить до виникнення в матеріалі суттєвих поверхневих напружень. Це викликає серйозні перепони для застосування методу, оскільки близько 60% дифрагованого випромінювання надходить від поверхневого шару товщиною 5 мкм.

6. Комплексні експериментально-обчислювальні методи аналізу напружень.

Комплексні експериментально-розрахункові методи ґрунтуються на комбінації експериментальних і розрахункових чисельних методів. Експериментальні дані звичайно одержують для фізичної моделі реальної конструкції, яку можна адекватно

описати за допомогою математичних і фізичних моделей. Комбінація математичних і фізичних моделей, що доповнюють одна одну, дозволяє краще проаналізувати конструкцію й одержати найцінніші результати при аналізі напружень. Аналіз напруженого стану елементів натурних конструкцій, як правило, реалізується на основі виміру деформацій на поверхні об'єкта дослідження, яке проводиться одним з багатьох експериментальних методів. Отримані на поверхні елемента конструкції деформації, наприклад, за допомогою тензодатчиків можуть бути використані як граничні умови при вирахованні напруженого стану за допомогою рівнянь теорії пружності. Тому від результатів, отриманих тим або іншим експериментальним методом вимагається відповідної точності й визначеності. В протилежному випадку чисельне моделювання дає результати з очевидними помилками. На жаль, за допомогою експериментальних методів не завжди можна одержати результати із прогнозованою точністю.

Ефективність комплексних експериментально-обчислювальних методів в експериментальній механіці переконливо ілюструє застосування їх при розв'язку плоских і об'ємних задач пружності, задач біомеханіки й механіки руйнування.

7. Метод акустичної емісії.

Метод акустичної емісії використовує випромінювання пружних хвиль при динамічній локальній перебудові структури матеріалу й утворенні тріщин. Руйнування твердих тіл, в основному, відбувається в результаті виникнення й розвитку тріщиноподібних дефектів. Тому дослідження взаємозв'язку цих процесів з параметрами випромінюваних пружних хвиль є особливо важливим. Вчасно виявлений методом АЕ дефект у будь-якому конкретному виробі або конструкції з певними його координатами дасть можливість запобігти їхньому передчасному катастрофічному руйнуванню. Це, насамперед, важливо для об'єктів довгочасної експлуатації й відповідального призначення, експлуатованих у різних сферах виробництва. Метод акустичної емісії має наступні недоліки:

- 1) він не дозволяє вимірювати напруження, а застосовується для контролю виникнення руйнування конструкції;
- 2) для використання методу акустичної емісії конструкцію необхідно навантажувати;
- 3) інтенсивність акустичної емісії сильно залежить від матеріалу й акустичного контакту;
- 4) при акустично-емісійному контролі, як правило, присутні хибні сигнали акустичної емісії;
- 5) важко відрізнити хибні сигнали від корисних сигналів акустичної емісії;
- 6) акустично-емісійний контроль подає обмежену інформацію про тип дефекту.

8. Ультразвукові методи.

Ультразвуковий аналіз напружень оснований на залежності швидкості поширення хвилі в пружних тілах від напружень, наявних у них. По цьому методу в досліджуванім тілі генерують ультразвукові (поздовжні, зсувні поперечні або поверхневі Релея) хвилі й вимірюють зміну швидкості поширення цих хвиль залежно від напруження.

Ультразвуковий метод – досить загальний метод визначення напружень у твердих тілах, у тому числі й залишкових. У певному сенсі цей метод поріднений з уже згаданим раніше методом фотопружності, але має деякі переваги: дозволяє визначати напруження не тільки на моделях, але й безпосередньо в натуральних виробах; дає можливість визначити роздільно головні напруження без додаткових процедур, що мають місце для методу фотопружності (чисельне інтегрування, заморожування й розрізування і т.п.). Ультразвукові методи, так само як і рентгенівські, відносяться до

класу неруйнівних методів, причому ультразвукові методи, очевидно, більш перспективні для аналізу тривимірних і поверхневих залишкових напружень.

Пружна хвиля, яка поширюється у твердому тілі, характеризується наступними основними параметрами: швидкістю, дисперсією, амплітудою, частотою й напрямком вектора поляризації. Використовуючи таку кількість характеристик руху пружної хвилі, можна одержати необхідну інформацію про стан і фізичні властивості досліджуваних твердих тіл. Висока проникаюча здатність ультразвукових коливань робить ці методи більш універсальними в порівнянні з іншими й практично незалежними від агрегатного стану досліджуваної речовини. Тому в теоретичних розробках в області нелінійної теорії пружності, фізичної й нелінійної акустики, проведених у нашій країні й за кордоном, поряд з різними аспектами фізичної акустики, приділяється велика увага дослідженню властивостей твердих тіл за допомогою ультразвукових хвиль.

Таким чином, проведений аналіз показав, що найбільш прийнятним методом для визначення залишкових напружень у матеріалах і елементах конструкцій реальних виробів є ультразвуковий неруйнівний метод.

Ультразвуковий неруйнівний метод [1, 2, 4], розроблений в Інституті механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України й Інституті електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України з урахуванням результатів, отриманих останнім часом в Інституті механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, може бути запропонований, як основний метод визначення залишкових напружень у матеріалах і елементах різних конструкцій. Він є найбільш ефективним методом, що дозволяє:

- а) вимірювати напруження (у тому числі й залишкові напруження) в елементах конструкцій і в натурних виробах навіть без часткового їхнього руйнування;
- б) визначати напруження й у моделях конструкцій і в натурних конструкціях. Це усуває потребу в побудові теорії моделювання, яка переводить результати вимірів, отриманих на моделях до натурних конструкцій;
- в) одержувати інформацію про напруження в розглядуваний момент часу; для реалізації вимірів досить проводити акустичні виміри лише в реальний момент часу;
- г) роздільно визначати кожне напруження як у випадку одновісних напружених станів, так і у випадку двовісних і тривісних напружених станів елементів конструкцій, а також і в приповерхневих шарах матеріалів без додаткових процедур і підходів, що виходять за межі цього методу.

Його фізичною й теоретичною основою є співвідношення акустопружності, які встановлюють зв'язок між величинами фазових швидкостей поздовжніх, поперечних і поверхневих хвиль Релея з величинами початкових (залишкових) напружень, що виникають у пружнім тілі. Ці акустичні співвідношення побудовані на основі тривимірної лінеаризованої теорії поширення пружних хвиль у тілах з початковими напруженнями [1, 2]. Дослідження закономірностей напруженого стану твердого тіла проводиться на основі тривимірної лінеаризованої теорії поширення пружних хвиль у тілах з початковими напруженнями за наступною схемою: задаються величини й структури початкових (залишкових) напружень; для тіл різної форми й для різного типу хвиль із застосуванням апарата тривимірної лінеаризованої теорії поширення пружних хвиль у тілах з початковими напруженнями (аналітичні й чисельні методи) визначаються швидкості поширення хвиль у залежності від величини початкових (залишкових) напружень [1 – 7].

Проведений аналіз показав, що найбільш сучасним і ефективним методом, що дозволяє визначати напруження в матеріалах і елементах різних конструкцій є ультразвуковий неруйнівний метод, розроблений в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України й Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України. Цей метод дозволяє робити виміри одно-, дво- і тривісних напружень в ізотропних й

квазіізотропних матеріалах, а також у приповерхневих шарах масивних конструкційних елементів [1, 2, 4].

Основні співвідношення неруйнівного ультразвукового методу визначення напружень у твердих квазіізотропних деформованих тілах, представлені через частоти рециркуляції відповідних імпульсів, мають такий вигляд:

– для визначення тривісних напружень:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^0 &= \frac{F_{\text{ж}_1} - F_{\text{ж}_1}^0}{F_l^0} A_{11} + \frac{F_{\text{ж}_2} - F_{\text{ж}_2}^0}{F_s^0} A_{12} + \frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_3}^0}{F_s^0} A_{13} ; \\ \sigma_{22}^0 &= \frac{F_{\text{ж}_1} - F_{\text{ж}_1}^0}{F_l^0} A_{21} + \frac{F_{\text{ж}_2} - F_{\text{ж}_2}^0}{F_s^0} A_{22} + \frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_3}^0}{F_s^0} A_{23} ; \\ \sigma_{33}^0 &= \frac{F_{\text{ж}_1} - F_{\text{ж}_1}^0}{F_l^0} A_{31} + \frac{F_{\text{ж}_2} - F_{\text{ж}_2}^0}{F_s^0} A_{32} + \frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_3}^0}{F_s^0} A_{33} .\end{aligned}$$

– для визначення двовісних напружень:

$$\begin{aligned}\sigma_{33}^0 - \sigma_{22}^0 &= \left(\frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_3}^0}{F_s^0} - \frac{F_{\text{ж}_2} - F_{\text{ж}_2}^0}{F_s^0} \right) A ; \\ \sigma_{33}^0 + \sigma_{22}^0 &= \left(\frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_3}^0}{F_s^0} + \frac{F_{\text{ж}_2} - F_{\text{ж}_2}^0}{F_s^0} \right) B .\end{aligned}$$

– для визначення одновісних напружень:

$$\sigma_{33}^0 = \frac{F_{\text{ж}_3} - F_{\text{ж}_2}}{F_s^0} .$$

При використанні методу частотної рециркуляції імпульсу для кожної зі швидкостей поширення поздовжньої й поперечних хвиль обчислюється величина

$$F = \frac{C}{2tn} ,$$

де C – будь-яка зі швидкостей, які розглядаються; t – характерний лінійний розмір; n – номер луни-імпульсу.

У наведених виразах індексом «нуль» позначені швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, а також частоти рециркуляції відповідних імпульсів у матеріалі без початкових напружень.

Зауважимо, що в реальних умовах визначення швидкості поширення пружних хвиль із достатньої для оцінки напружень точністю (до 10^{-5}) є складним завданням. Тому зручніше вимірювати не швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, а частоту рециркуляції імпульсу. У зв'язку з цим на практиці для визначення напружень в твердих тілах використовується метод частотної рециркуляції імпульсу та наведені вище основні співвідношення.

Важливою відмінністю результатів, отриманих фахівцями Інституту механіки імені С.П.Тимошенка НАН України й Інституту електрозварювання імені Е.О.Патона НАН України, є створення підходів для визначення тривісних напружень (включаючи двовісні й одновісні напруження) у той час, коли переважна більшість досліджень, проведених в інших країнах і наукових центрах, присвячені створенню підходів для визначення тільки одновісних напружень.

1. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в двух частях. Ч. 1. Общие вопросы. Волны в бесконечных телах и поверхностные волны. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 501 с.
2. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в двух частях. Ч. 2. Волны в частичноограниченных телах. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 505 с.
3. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г. Акустоэлектромагнитоупругость (Механика связанных полей в элементах конструкций. В 5-и томах / Под ред. А.Н.Гузя. Т. 3. – К.: Наук. думка, 1988. – 288 с.
4. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – К.: Наук. думка, 1974. – 108 с.
5. Guz A.N. On the foundations of the ultrasonic non-destructive determination of stresses in near-the-surface layers of materials. Review // J. Phys. Science and Application. – 2011. – 1, N 1, June. – P. 1 – 15.
6. Guz A.N. Ultrasonic Nondestructive Methods of Stress Analysis in Materials and Structural Members (review) // Int. Appl. Mech. – 2011. – 46, N 11. – P. 1213 – 1220.
7. Guz A. N. Ultrasonic Nondestructive Method for Stress Analysis of Structural Members and Near-Surface Layers of Materials: Focus on Ukrainian Research (Review) // Int. Appl. Mech. – 2014. – 50, N 3. – P. 231 – 252.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПУШЕННЯ ІЗОТРОПНОГО МАТЕРІАЛУ В ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ПРОСТОРОВИХ ТА ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ

М.О. Бабешко, В.Г. Савченко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ

Розроблено методику розв'язання задач термопластичності для просторових тіл та оболонок обертання в процесах неосесиметричного неізотермічного навантаження з урахуванням виду напруженого стану та пластичного розпушення ізотропного матеріалу. Методика базується на використанні визначальних рівнянь варіанту теорії термопластичного леформування вздовж траєкторій малої кривизни, започаткованого в роботах Ю.М. Шевченка та його учнів. Визначальні рівняння містять дві нелінійні залежності, одна з яких здійснює зв'язок між другими інваріантами девіаторів напружень і деформацій, температурою та кутом подібності девіаторів напружень, а друга – між першими інваріантами відповідних тензорів, температурою та згаданим кутом. Нелінійність залежності між першими інваріантами тензорів напружень та деформацій обумовлена наявністю пластичної складової середньої деформації. Параметри визначальних рівнянь конкретизуються на основі експериментів на трубчастих зразках: на розтяг, стиск та кручення або на розтяг та внутрішній тиск при

пропорційному навантаженні при кількох різних значеннях кута виду напруженого стану та температури. За результатами експериментів будуються таблиці залежностей між першими інваріантами тензорів напружень та деформацій та другими інваріантами відповідних девіаторів при різних фіксованих значеннях температури та кута виду напруженого стану. Визначальні рівняння разом з рівняннями рівноваги та співвідношеннями Коші утворюють повну систему рівнянь для визначення невідомих переміщень, деформацій та напружень. Задачу термопластичності розв'язуємо поетапно, знаходячи розв'язок на кожному етапі методом послідовних наближень.

Сформульовано розв'язувальні системи для визначення термопружнопластичного стану осесиметричних просторових тіл та оболонок та розроблено алгоритми розв'язання відповідних крайових задач. При неосесиметричному навантаженні задані навантаження та розв'язувальні функції представляються у вигляді тригонометричних рядів по коловій координаті. Для просторових тіл обертання використовується варіаційне рівняння Лагранжа та метод скінченних елементів. Задача зводиться до розв'язання в кожному наближенні на кожному етапі навантаження систем алгебраїчних рівнянь, коефіцієнти і праві частини яких обчислюються за результатами попереднього наближення. При розв'язанні систем алгебраїчних рівнянь використовується метод Гауса. Для оболонок обертання при використанні гіпотез Кірхгофа - Лява задача зводиться до розв'язання в кожному наближенні на кожному етапі навантаження систем звичайних диференціальних рівнянь, праві частини яких обчислюються за результатами попереднього наближення. При розв'язанні систем диференціальних рівнянь використовується метод Рунге - Кутта з дискретною ортогоналізацією та нормалізацією.

На конкретних прикладах проаналізовано вплив від врахування кожної з нелінійних залежностей на результати розрахунків НДС. Зокрема, проаналізовано вплив від врахування нелінійної залежності між першими інваріантами тензорів напружень і деформацій на результати розрахунку НДС. На прикладі тонкої оболонки показано, що врахування пластичного розпушення змінило результати розрахунку НДС оболонки на 20 – 40%.

ВИГІН ТРИВИМІРНОГО БРУСА ПРИ НАЯВНОСТІ ВЕЛИКИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

О.Д.Петров¹, Ю.А.Черняков¹, П.О.Стеблянко²

¹*Дніпровський національний університет імені О. Гончара, Дніпро,*

²*Інститут механіки імені С.П.Тимошенка НАН України*

В доповіді досліджено локальний вигин тривимірного бруса прямокутного перерізу при наявності великих пластичних деформацій (рисунки 4.4).

Геометрія тривимірного стрижня (бруса) задана так: $x \in [-H; H], y \in [-L; L], z \in [-h; h]$. Положення опори $x = 0, y \in [-L; L], z = 0$. Брус, що згинається, розміщений симетрично на центральній опорі. На його краях задається вертикальна швидкість переміщень у вузлах на торцях. В місці опори вертикальні переміщення точок бруса і відповідно швидкість переміщення дорівнюють нулю. Вся інша поверхня бруса вільна від напружень.

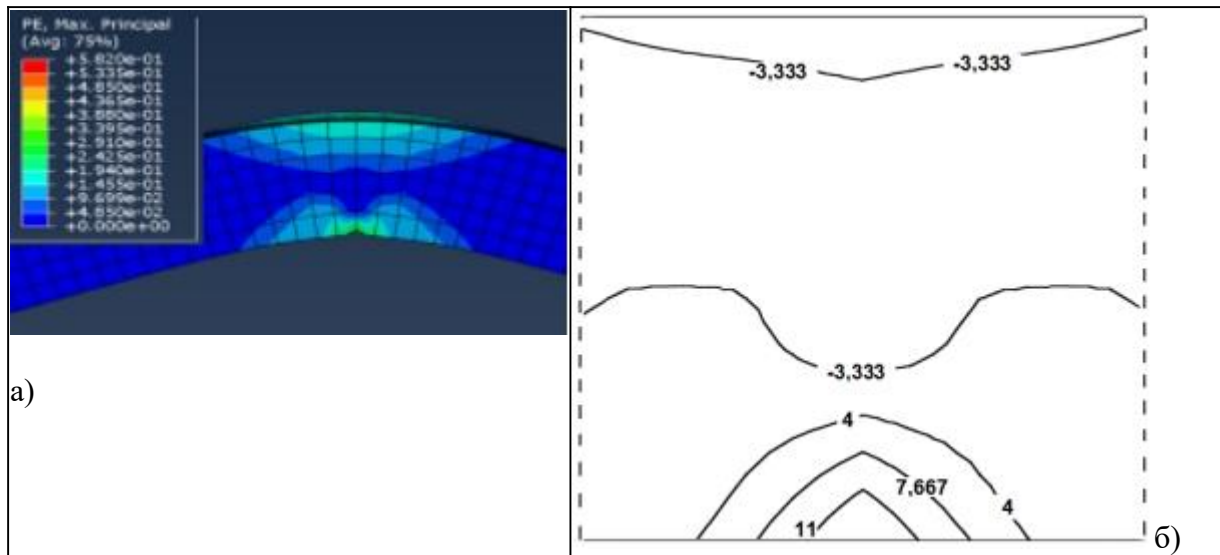


Рисунок 1. Локальний вигин тривимірного бруса прямокутного перерізу при наявності великих пластичних деформацій

Поле інтенсивності деформацій розраховане за допомогою формул тривимірного варіанту методу покомпонентного розщеплення. В просторовій сітці було вибрано $N_1 = 21$, $N_2 = N_3 = 7$. Кроки інтегрування по координатам, часу та розміри були такі: $\tau = 0,001$; $h_1 = h_2 = h_3 = 0,05$; $H = 1$; $L = h = 0,3$.

На рисунку 1а) показана схема навантаження бруса. Поле інтенсивності деформацій розраховане за допомогою системи інженерного аналізу ABAQUS. Результати розрахунків для максимальних значень інтенсивності деформації $(\varepsilon_u)_{\max} \approx 14\%$ показано на рисунку 1б). Зазначимо, що максимальне значення інтенсивності деформації має місце в околі точки опори бруса.

Для уточнення була обрана сітка, за допомогою якої проводиться коригування результатів в геометрично нелінійній області N. Кроки інтегрування в зоні кінцевих деформацій були зменшені у відношенні 1:8 по осі y та z і 1:12 по осі x . В результаті в рамках запропонованого методу враховано можливість зміни форми і розмірів бруса при наявності великих деформацій.

На рисунку 1 дано поле інтенсивності деформації після припинення згину бруса. На торцях припиняється дія вертикальних складових швидкостей переміщень. Торці стають вільними (напруження у вузлах торців дорівнюють нулю) і відбувається часткове розвантаження в околі опори шляхом чистого вигину бруса в протилежному напрямку.

В розв'язаній задачі мало місце часткове розвантаження починаючи зі значення інтенсивності деформації в 14%. Розглянемо другий приклад використання інтерполяційної формули і розбудуємо частину діаграми матеріалу, яка задана таблицею 1. при розвантаженні

Таблиця 1

i	1	2	3	4	5
$\sigma_i \downarrow$	519	743	967	1296	1625
$\varepsilon_i \downarrow$	10	11	12	13	14

Числові результати отримані для загальної частини $\varepsilon \in [1; 13]$ і наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

$\varepsilon\% \downarrow$	$\sigma(\varepsilon) \downarrow$	$\sigma_{III}(\varepsilon)$	$\sigma_{IV}(\varepsilon)$	$\delta\%$
11	743	743	743	0
11,2	787,8	784,44	774,36	0,642
11,4	832,6	826,72	813,28	0,813
11,6	877,4	870,68	858,92	0,675
11,8	922,2	917,16	910,44	0,366
12	967	967	967	0
12,2	1032,8	1021,04	1027,76	0,329
12,4	1098,6	1080,12	1091,88	0,544
12,6	1164,4	1145,08	1158,52	0,587
12,8	1230,2	1216,76	1226,84	0,414
13	1296	1296	1296	0

Зазначимо, що наведені інтерполяційної формули дають гарний результат навіть обраний для приклада грубій сітці по деформаціям. Максимальна відносна розбіжність $\delta\% = 100 * (\sigma_*(\varepsilon) - \sigma(\varepsilon)) / \sigma(\varepsilon)$ до 0,65%.

Для порівняння поле інтенсивності деформацій отримане і за допомогою системи інженерного аналізу ABAQUS при $(\varepsilon_u)_{\max} \approx 14\%$ наводиться відповідно на рисунку 1 а). Має місце якісне співпадіння результатів розрахунків. Особливістю є те, що для досягнення кількісного співпадіння результатів в околі опори бруса в програмі ABAQUS треба дещо по іншому задавати граничні умови (не в одній точці опори, а і в декількох сусідніх). Алгоритм розрахунків тривимірної нестационарної задачі для функціонально-неоднорідного матеріалу полягав в наступних трьох кроках. На першому з них розв'язується відповідна лінійна задача (L) і визначається область тіла де інтенсивність деформації більше ніж умовна границя $\varepsilon_u^N = 7\%$ (область N). Зазначимо, що для цього можна використовувати і програми інженерного аналізу. На другому кроці в області N тіла розв'язується задача в геометрично нелінійній постановці. Третій крок це уточнення області N і самого розв'язку.

На третьому кроці проводилось уточнення області N і самого розв'язку. Особливістю постановки задачі по уточненню області N є формулювання граничних умов в околі опори. Якщо для L задачі лише в місці опори $x = 0, y \in [-L; L], z = 0$ вертикальні переміщення точок пластини і відповідно швидкість переміщення дорівнюють нулю. В N задачі при уточненні геометрично нелінійного рішення нульові вертикальні переміщення точок пластини і відповідно швидкість переміщення задавались в області $x \in [-mh_1; mh_1], m = 1; 2; \dots, y \in [-L; L], z = 0$.

Друга особливість уточнення в N задачі полягає в зменшенні кроків інтегрування по координатам. При цьому для виконання умови стійкості треба пропорційно зменшувати і крок інтегрування за часом. В результаті може значно збільшитись кількість таких кроків і взагалі час розрахунку.

Третя особливість полягає в вирішенні додаткової задачі інтерполяції шуканих величин у вузлах нової більш дрібної сітки по відповідним значення у вузлах основної сітки. Ця задача вирішена за допомогою двовимірної сплайн-функції.

В задачі для бруса для уточнення геометрично нелінійного рішення також треба збалансувати дві протилежні тенденції. З одного боку в N-задачі для пластини треба розглянути лише 12 комірок просторової сітки замість 720 (лише 1,67 %). Кількість додаткових обчислювальних операцій на початковій сітці теж суттєво зменшується. З іншої сторони для достовірного порівняння результатів треба при зменшенні кроків інтегрування по координатам збільшувати кількість кроків інтегрування за часом. Ця проблема розв'язувалась за допомогою послідовності числових результатів отриманих на сітці з меншими розмірами комірок.

НЕЛІНІЙНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ГНУЧКИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ ФОРМИ ІЗ МАТЕРІАЛІВ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ЩО ЗАЛЕЖАТЬ ВІД ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

О.З. Галішин, С.М. Склепус

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

Для багатьох матеріалів (легкі сплави, суперсплави, сірий чавун, полімери, композити та ін.) характерна залежність деформаційних характеристик від виду напруженого стану за межами лінійної пружності. Залежність характеристик матеріалу від виду напруженого стану проявляється в таких ефектах деформування як неоднакова опірність розтягу та стиску, незалежний закон деформування при чистому крученні, непружна стисливість, вплив гідростатичного стиску, ефект Пойнтинга. Діаграми деформування таких матеріалів є нелінійними і містять малу початкову лінійну ділянку, на якій модулі Юнга при розтягу та стиску приблизно збігаються. При більшому навантаженні проявляється нелінійний характер деформування, за якого діаграми за розтягу і стиску суттєво відрізняються.

Дослідження фізично і геометрично нелінійного деформування пологих оболонок складної форми в плані стикаються з певними математичними труднощами, що виникають при розробці фізико-механічних моделей процесів деформування та реалізації чисельних наближених розв'язків крайових задач в областях неканонічної форми. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогодні відсутні роботи, присвячені дослідженню процесів фізично та геометрично нелінійного деформування пологих оболонок складної форми з таких матеріалів.

Розроблено новий чисельно-аналітичний метод розв'язання геометрично і фізично нелінійних задач згину пологих оболонок складної форми в плані із матеріалів з характеристиками, що залежать від виду напруженого стану. Для лінеаризації вихідної нелінійної задачі використовувався метод неперервного продовження за параметром, який пов'язаний із зовнішнім навантаженням. Для варіаційної постановки лінеаризованої задачі побудовано функціонал у формі Лагранжа, заданий на кінематично можливих швидкостях переміщень. Для знаходження основних невідомих задачі нелінійного згину пологої оболонки (переміщення, деформації, напруження) сформульовано задачу Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь. Задача Коші розв'язувалася методом Рунге–Кутта–Мерсона з автоматичним вибором кроку. Початкові умови знаходяться з розв'язку задачі геометрично лінійного деформування. Праві частини диференціальних рівнянь при фіксованих значеннях параметра навантаження, що відповідають схемі Рунге–Кутта–Мерсона, знаходилися з розв'язку варіаційної задачі для функціонала Лагранжа. Варіаційні задачі розв'язувалися методом

Рітца в поєднанні з методом R-функцій. Останній дає змогу подати наближений розв'язок у вигляді формули – структури розв'язку, яка точно задовольняє всі (загальна структура) або частину (часткова структура) граничних умов. Розв'язано задачі нелінійного деформування квадратної циліндричної оболонки й оболонки складної форми з комбінованими умовами закріплення. Досліджено вплив напрямку зовнішнього навантаження, геометричної форми й умов закріплення на напружено-деформований стан.

ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ТРІЩИН НА МЕЖІ ПОДІЛУ МАГНІТОЕЛЕКТРОПРУЖНИХ ПІВПРОСТОРІВ

Т.В. Ходанен, Н.В. Шевельова

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто задачу для магнітоелектропружного біматеріала із системою із N тріщин $a_1 \leq x_1 \leq b_1, a_2 \leq x_1 \leq b_2, \dots, a_n \leq x_1 \leq b_n$ довільної довжини. На нескінченності прикладено змішане механічне навантаження, електричне та магнітне поля, паралельній фронтам тріщин: $\sigma_{33}^{(m)} = \sigma^\infty, \sigma_{13}^{(m)} = \tau^\infty, E_1^{(m)} = E^\infty, H_1^{(m)} = H^\infty$, а навантаження $\sigma_{11}^{(m)} = \sigma_{xxm}^\infty, D_1^{(m)} = D_{xm}^\infty, B_1^{(m)} = B_{xm}^\infty$ забезпечують виконання умов неперервності віддаленої частини межі поділу матеріалів. Отже, має місце плоска деформація у площині, ортогональній фронтам тріщин.

Подано представлення всіх електромагнітомеханічних величин через кусково-аналітичні функції. Сформульовано та аналітично розв'язано задачу лінійного спряження Рімана-Гільберта. Отримано в замкненому вигляді вирази для механічних, електричних та магнітних компонент вздовж інтерфейсу. Всі поля мають осциляційну сингулярність у вершинах тріщин. Отримано асимптотичні представлення електромагнітомеханічних полів у вершинах тріщин. За допомогою методу віртуального закриття тріщини отримано формули для швидкості звільнення енергії у їхніх вершинах.

Отримані аналітичні результати проілюстровано чисельними результатами для біматеріальних композитів на основі $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ з різними об'ємними частками BaTiO_3 для верхнього і нижнього півпросторів. Вивчено вплив взаємного розташування, відносної довжини та зарядів сусідніх тріщин, а також різних значень магнітного та електричного потоків на розкриття тріщин та швидкість звільнення енергії у їхніх вершинах. Встановлено, що зближення тріщин та збільшення їхнього сумарного заряду викликає суттєве збільшення швидкості звільнення енергії. Вплив же магнітного потоку на механічні та електричні компоненти є несуттєвим.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

Л.І.Книш, Д.В. Захаров

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Ефективність більшості типів сонячних фотоелектричних панелей (c-Si, poly-Si, CIGS, HJT та ін.) суттєво падає під впливом високих температур. Ця особливість, що пов'язана із фізичною природою сонячних елементів, дуже негативно впливає на графік навантаження системи, створює додаткові труднощі при плануванні об'ємів видобутку електрики та її передачі в загальну мережу або конкретному споживачеві.

Для зменшення зазначеного негативного ефекту використовують активні та пасивні методи охолодження. До пасивних методів охолодження відносять спеціальні методи установки та монтажу сонячних панелей, в яких враховуються географічні, кліматичні та техногенні фактори. Значний вплив на температурний режим сонячних панелей може мати особливості їх дизайну, теплофізичні та оптичні характеристики конструктивних елементів. З економічної точки зору пасивні методи охолодження достатньо прийнятні, але їх енергетична ефективність є невисокою.

Значно більші енергетичні показники може гарантувати використання активних методів охолодження. До таких методів відноситься додавання в конструкцію сонячної панелі додаткових шарів, в яких циркулює рідинний або газоподібний охолоджувач. Така система відносно коштвна з економічної точки зору, але є дуже енергоефективною. По-перше, теплоносій-охолоджувач знімає зайве тепло з шару сонячних елементів, не допускає їх перегрівання і, тим самим, забезпечує гарантовані виробником показники ефективності сонячних елементів. По-друге, додаткова теплота, що передається теплоносію, може бути використана для різних потреб. Тим самим в одному пристрої паралельно генерується як теплова, так і електрична енергія.

Енергетична та економічна ефективність комбінованих фототермоелектричних систем (PV/T) напряму залежить від рівня досконалості їх конструкції та безперебійної роботи системи автоматики. Для визначення співвідношення відповідних геометричних, динамічних та теплофізичних параметрів розроблена гнучка нестационарна нелінійна математична модель, в якій передбачається вибір дизайну PV/T, вибір типу сонячних елементів та відповідного типу теплоносія. На основі розробленої математичної моделі був створений числовий алгоритм та власний комп'ютерний код, реалізований в системі Mathematica. Вибір цього програмного засобу пов'язаний із можливістю підключення в код реальних кліматичних даних з місця функціонування PV/T систем.

Тестові розрахунки проводились для чотирьох типів конструкцій PV/T систем: з та без захисного скляного конвертом та охолодженням сонячним елементів з тильної сторони; з та без захисного конверту та охолодженням сонячним елементів з фронтальної сторони. Розрахунки показали, що у кожній з обраних конструкцій є свої переваги та недоліки. Найкращі показники електричної ефективності забезпечує конструкція PV/T системи без захисного скла та з фронтальним охолодженням сонячних елементів. Але при цьому теплова ефективність такого пристрою є невисокою. Значно вище теплові показники має PV/T колектор із тильним охолодженням, але таке охолодження майже не впливає на температурний режим сонячних елементів. Цей тип PV/T систем можна рекомендувати лише для оптимізації простору, де вони локалізовані.

АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ БАГАТОФАКТОРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Сметанкіна Н.В.¹, Місюра С.Ю.^{1,2}, Місюра Є.Ю.²

¹*Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України*

^{1,2}*Національний технічний університет «ХПІ»*

³*Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця*

Широке застосування конструкцій з композиційних матеріалів пов'язані з їх поліпшеними, порівняно однорідними, характеристиками. Завдяки високим якостям міцності і підвищеної жорсткості в поєднанні з малою вагою композиційні матеріали широко використовуються в космічному, авіа- і суднобудуванні, транспортному машинобудуванні [1–3]. Найбільш повно нині досліджено питання статичного деформування композитних елементів конструкцій та його вільні коливання [4–6]. Перехідні процеси у таких конструкціях менш вивчені [7, 8].

Нестаціонарні процеси у шаруватих елементах конструкцій можуть бути викликані короткочасними інтенсивними навантаженнями різної природи [9, 10]. Ускладнення умов роботи сучасних композитних конструкцій, пов'язане з імпульсними та ударними навантаженнями, різноманітність форм конструктивних елементів, застосування нових матеріалів, призводять до того, що розробка методів розв'язання задач про напружено-деформований стан композитних пластин і оболонок довільної форми є актуальною задачею динаміки конструкцій.

Пропонується методика дослідження процесів нестаціонарного деформування шаруватих композитних елементів конструкцій аерокосмічної техніки при імпульсному навантаженні та ударі твердим тілом. Розглядається шаруваті елементи, які виконані у вигляді пластин та оболонок із складною формою плану, що складається з ортотропних шарів сталої товщини. Пластина або оболонка віднесені до декартової системи координат, пов'язаної із зовнішньою поверхнею першого шару, і займає на координатній площині однозв'язну область, яка обмежена криволінійним контуром. Передбачається, що для пакету шарів у виконується гіпотеза типу С.П. Тимошенка. Напруження в шарах визначаються за законом Гука для ортотропного тіла [9]. Зусилля та моменти визначаються шляхом інтегрування відповідних компонентів тензора напружень вздовж товщини пластини або оболонки.

Рівняння руху елемента конструкції та граничні умови отримано з варіаційного принципу. При розв'язанні задачі про ударну взаємодію індентора з конструкцією система рівнянь руху доповнюється рівнянням руху індентора, а також умовою спільності переміщення індентора та конструкції. Контактна взаємодія враховується з урахуванням модифікованого закону Герца. Задача динаміки шаруватої пластини та оболонки довільної форми розв'язується методом занурення [4, 10]. В результаті задача зводиться до розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку щодо коефіцієнтів розвинення функцій переміщень у ряди Фур'є. Отримана система інтегрується шляхом розвинення розв'язку у ряд Тейлора.

Як репрезентативний приклад досліджено коливання шарнірно опертої тришарової пластини з ортотропних шарів при ударі індентором у вигляді сталеві кулі. Удар

наноситься із зовнішньої поверхні першого шару пластини. Форму плану пластини описується рівняннями Ламе. Порівняння результатів розрахунку прогинів та нормальних напружень з результатами, які отримані методом скінченних елементів показало їх добре узгодження, що підтверджує достовірність результатів. Незважаючи на високий рівень інтенсивності ударного навантаження, напруження не перевищили своїх допустимих значень, що дозволяє прогнозувати працездатність та надійність такого елемента за його експлуатації в умовах реального навантаження.

Таким чином, розроблено методику дослідження перехідних процесів у шаруватих композитних пластинах та оболонках зі складною формою плану, яка враховує геометрію області на аналітичному рівні, що підвищує точність отриманих результатів. Запропонована методика може бути використана при проектуванні шаруватих елементів конструкцій аерокосмічної техніки за нестационарних навантажень різної природи.

Література

1. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary calculation models for elastic properties clarification of three-dimensional nanocomposites based on the combination of finite and boundary element methods. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 351–356.
2. Misura S. Yu. Hydroelastic vibrations of the covers on water turbines with the upper ring of the guide vanes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. 6(7), 4–10. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55664>
3. Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D. Simulating the process of a bird striking a rigid target. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. P. 711–721. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_71
4. Smetankina N., Merkulova A., Merkulov D., Misura S., Misiura Ie. Modelling thermal stresses in laminated aircraft elements of a complex form with account of heat sources. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 534. Springer, Cham. P. 233–246. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_22
5. Malykhina A.I., Merkulov D.O., Postnyi O.V., Smetankina N.V. Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates. Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control system”. 2019. Vol. 41. P. 46–54. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2019-41-05>
6. Smetankina N., Postnyi O. Nonstationary heat conduction in multilayer glazing subjected to distributed sources. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2020. Vol. 10, No 2. P. 28–31. <https://doi.org/10.35784/iapgos.930>
7. Сметанкіна Н.В., Шупіков О.М., Угримов С.В. Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багатошарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях. Вісник Херсонського національного технічного університету. Херсон. 2016. № 3(58). С. 408–413.
8. Шупіков А.Н., Бузько Я.П., Сметанкіна Н.В., Угримов С.В. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация. Харьков: ХНЭУ, 2004. 252 с.
9. Smetankina N., Semenets O., Merkulova A., Merkulov D., Misura S. Two-stage optimization of laminated composite elements with minimal mass. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2023. Vol. 536. P. 456–465. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42

10. Smetankina N.V., Postnyi O.V., Misura S.Yu., Merkulova A.I., Merkulov D.O. Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 506–509. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42

ШАРУВАТА ОСНОВА З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ ДІЇ РУХОМОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Ю. П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Специфічні інженерні проблеми і закони внутрішнього розвитку фундаментальних досліджень вимагають послідовного і більш повного врахування фізико-механічних характеристик матеріалів та інших властивостей, властивих реальним тілам. Дане дослідження спрямовано на вивчення закономірностей хвильових процесів в пружних шаруватих тілах при врахуванні ряду ускладнюючих факторів: різних моделей шаруватого покриття, початкових напружень, різних швидкостей руху поверхневого навантаження. Розв'язок вказаних задач передбачає встановлення закономірностей впливу початкових напружень, швидкості руху навантаження, геометричних та механічних характеристик покриття на напружено-деформований стан пружної основи. Цілі та задачі дослідження є надзвичайно актуальними як з фундаментальної, так і з практичної точки зору для підвищення надійності і довговічності інженерних споруд. В даній роботі розглянута плоска задача про дію рухомого поверхневого навантаження на пружний нестисливий півпростір з захисним покриттям та початковими напруженнями. Розглядаються і порівнюються дві моделі двошарового півпростору: 1) верхній шар (захисне покриття) моделюється зосередженими масами; 2) рух поверхневого шару описується системою рівнянь з теорії пластин.

Дослідження були проведені у рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями [1]. Для розв'язку задачі використаний інтегральний метод Фур'є. Аналітичні результати приведені в загальному вигляді для матеріалів з довільним пружним потенціалом, для випадків нерівних і рівних коренів характеристичних рівнянь, для різних умов сполучення елементів шаруватого середовища і для будь-якої швидкості руху навантаження. Для числового аналізу розглядався матеріал з потенціалом Бартенєва-Хазановича. Розрахунки були проведені в рамках теорії скінченних початкових деформацій.

Вивчений вплив тонкого поверхневого шару, початкових напружень, умов контакту елементів шаруватого середовища і швидкості руху поверхневого навантаження на розподіл швидкостей переміщень і напружень в нестисливій основі з початковими напруженнями.

При заданих початкових видовженнях темп росту значень величин, що досліджується, при стискуванні більше, ніж при розтягуванні. Загасання на відстані від точки прикладання навантаження відбувається повільніше при стискуванні, ніж при розтягуванні. Значення параметрів, що характеризують напружено-деформований стан основи і їх залежність від початкових напружень, визначаються координатами даної точки. Існують області півпростору, в яких значення напружень і швидкостей переміщень мало залежать від початкових деформацій. Зі збільшенням швидкості руху

навантаження вплив початкових напружень значно посилюється. Особливо це має місце для матеріалу, що попередньо стиснений.

При дозвукових швидкостях руху амплітуди параметрів, що досліджувались, значно більші для першої моделі півпростору (зосереджені маси). При надзвукових швидкостях така відмінність є не значною.

Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями. – Киев: «А.С.К.», 2004. – 672 с.

ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ ВЗДОВЖ ШАРІВ КОМПОЗИТНОГО СТИСЛИВОГО МАТЕРІАЛУ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

А. Ю. Глухов, Ю. П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Робота є продовженням циклу робіт вчених Інституту механіки НАН України з дослідження поширення пружних хвиль в шаруватих композиційних матеріалах з початковими напруженнями.

Вивченню закономірностей поширення гармонічних хвиль у шаруватих стисливих та нестисливих матеріалах періодичної структури, яка складається з двох компонентів, присвячені роботи О. М. Гузя, О. П. Жука, Ле Мінх Кханя, Н. А. Сітенка, Панасюка О.М., А.Ю. Глухова та інших. У найповнішій формі результати про поширення пружних хвиль в шаруватих композитних матеріалах з початковими напруженнями представлені в монографіях О. М. Гузя [1, 2] та інших.

У даній роботі проведені дослідження поширення пружних хвиль кручення в шаруватому композитному стисливому матеріалі з початковими напруженнями при проковзуванні шарів. Дослідження виконані в рамках тривимірної динамічної лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями з використанням методу, викладеного в [1].

Розглядається шаруватий композитний стисливий матеріал з початковими напруженнями, який складається з шарів двох типів, що чергуються. Матеріали шарів і їх початкові напружено-деформовані стани є однаковими для кожного типу шарів.

Вважаємо початковий напружений стан однорідним. Приймаємо, що для кожного з шарів мають місце наступні співвідношення:

$$S_{11}^{0(j)} = S_{22}^{0(j)} \neq S_{33}^{0(j)}, \quad \lambda_1^{(j)} = \lambda_2^{(j)}, \quad h^{(j)} = \lambda_3^{(j)} h^{(j)}, \quad j = 1, 2. \quad (1)$$

Також приймаємо, що

$$u_r^{(j)} \equiv 0; \quad u_\theta^{(j)} = u_\theta^{(j)}(r', y_3, \tau); \quad u_z^{(j)} \equiv 0. \quad (2)$$

У цьому випадку в представленні загальних розв'язків можна прийняти

$$\Psi^{r(j)} = \Psi^{r(j)}(r', y_3, \tau); \quad \chi^{r(j)} \equiv 0. \quad (3)$$

Дослідження закономірностей поширення пружних хвиль кручення у шаруватих композитних матеріалах з початковими напруженнями зводиться до побудови розв'язків рівняння руху при задоволенні граничних умов на площинах розділу шарів і умов періодичності Флоке.

Розглянуто випадок поширення хвиль уздовж шарів. Отримані дисперсійні рівняння для симетричних і антисиметричних хвиль, а також їх довгохвильові наближення.

Література

1. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями / А. Н. Гузь. – К.: А.С.К., 2004. – 672 с.
2. Гузь А.Н., Глухов А.Ю. Осесимметричные волны в высокоэластичном композитном материале с начальными напряжениями. – Киев, 2020. – ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим». – 94 с.

ВЛАСНІ ЧАСТОТИ НАГРІТОЇ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНКИ З ПРУЖНИМ ЩОДО ПОВОРОТУ КРАЄМ

О.М.Горечко, Н.О.Заводовська

Національний університет «Львівська політехніка», Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України

Пластины, как конструктивный элемент, широко используются у аэрокосмичній техніці, машинобудуванні, електроніці, будівництві тощо. Зокрема круглі пластины при дії динамічних навантажень були об'єктом інтенсивних досліджень з кінця дев'ятнадцятого століття [1]. Однак і досі проводяться теоретичні дослідження вібрацій круглих пластин, які використовують або пропонують нові числові та числово-аналітичні методи для пластин постійної та змінної товщини, враховують взаємодію з іншими середовищами, розглядають задачі динаміки в нелінійній постановці, аналізують вплив попередніх напружень на динамічні характеристики її поперечних коливань.

В роботі розглядається задача знаходження власних частот поперечних коливань круглої пластини, попередньо навантаженої в площині внаслідок нагріву рівномірними джерелами тепла та теплообміну з середовищем, при її пружному кріпленні на границі. Задача зводиться до послідовного розв'язування задач осесиметричної статичної термопружності та поперечних коливань пластинки при наявності попереднього напруженого стану.

Для статичної задачі термопружності в осесиметричному випадку і припущенні, що коефіцієнти теплообміну пластини з навколишнім середовищем та інтенсивність джерел тепла постійні, а край пластинки неподатливий, можна побудувати [2] загальний розв'язок, а звідси і розв'язок при довільному кріпленні краю.

Задача поперечних коливань пластинки формулюється для моделі Кірхгофа для осесиметричного поля температурних напружень при пружному кріпленні відносно повороту та жорсткому щодо нормальних переміщень зовнішнього контура. Вирази температурних напружень у вигляді комбінації функцій Бесселя першого роду та вироджених гіпергеометричних функцій занадто громіздкі, і не дозволяють продовжувати розв'язувати поставлену задачу аналітично. Найпростіші вирази для температурних напружень отримуються у випадку однорідної температури пластинки. Для цього випадку розв'язування задачі проводилось аналітично, побудовано частотне рівняння. У інших випадках нижчі власні частоти знаходились числовим методом скінчених елементів.

В результаті проведених обчислень проаналізовано вплив зміни температури пластинки на її найнижчі власні частоти для класичних ідеальних кріплень жорсткого

защемлення та шарнірного опирання. Показано, що нагрів/охолодження защемленої пластинки до 10 градусів призводить до зміни нижчих власних частот до 20%. Проаналізовано вплив пружності кріплення на нижчі власні частоти. При зміні коефіцієнта пружності на поворот нижчі власні частоти змінюються на 25-50%. Власні частоти опертої пластини є більш чутливими до зміни температури нагріву ніж частоти жорстко защемленої пластинки. Числовим методом побудовані залежності основної частоти від коефіцієнтів теплообміну пластинки з зовнішнім середовищем. Різниця основних частот при різній тепловіддачі з зовнішнього контура є більшою при низькій тепловіддачі з плоских поверхонь і суттєво зменшується при зростанні цієї тепловіддачі.

1. *Leissa A.W.* Vibration of Plates. Washington: NASA SP-160, 1969. – 360 p.
2. *Коваленко А.Д.* Термоупругость. Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.

АКТИВНО-ПАСИВНИЙ ВПЛИВ НА ДЕМАСКУЮЧІ ОЗНАКИ ДРОНІВ

Ю.С. Тарасенко

Університет митної справи і фінансів

Як правило, в приховуванні роботи безпілотних літальних апаратів (БПЛА або дрони) зацікавлені всі сторони, особливо в період їх конфронтації. Такі дрони, в залежності від позицій конфліктуючих сторін, прийнято ділити на ворожі і власні. У цьому випадку дуже ефективним для забезпечення безпеки підвідомчих об'єктів є використання безпілотників, які здатні в залежності від поставленого завдання здійснювати відеоспостереження на основі комп'ютерного зору [1]. Однак використання радіодіапазону як і раніше актуально - адже всепогодне радіолокаційне визначення, розрізнення, вимірювання та розпізнавання мають основоположне значення при створенні систем контролю і управління доступом, перш за все, критичної інфраструктури [2,3]. Тому, як і за активної радіолокації, технологія stels також прийнято використовувати для безпілотників. Це допомагає знизити радіолокаційну видимість об'єкта спостереження (тобто дрона) за рахунок зменшення його ефективної площі зворотнього розсіювання (ЕПЗР). З одного боку, значення ЕПЗР конкретного об'єкта спостереження (у радіолокації прийнято називати ціллю) дозволяє оцінити рівень відбитого вторинного електромагнітного випромінювання від такої цілі у вигляді її ефективної поверхні (S_{ef}), яка вимірюється у децибелах або м^2 . З іншого боку, технічні засоби отримання і аналізу S_{ef} (залежно від роздільної здатності радіолокаційної станції) дозволяють виявити сукупність "блискучих точок" дрона. Однак слід мати на увазі, що, оскільки реальну ціль можна зобразити у вигляді сукупності поверхонь розсіювання, то таку ціль, що має кілька блискучих точок, слід розглядати тільки як груповий випромінювач. При цьому зі зміною ракурсу цілі і її блискучі точки, як правило, мають блукати й змінювати свої значення. Зокрема, навіть для малих розвідувальних дронів, які використовуються на невеликих висотах і на відстанях, характерних для ближньої зони радіолокаційної взаємодії, цілком доцільно застосовувати методи розпізнавання з використанням ближньої радіолокації, оскільки оптична або лазерна ідентифікація менш ефективна через залежність від погодних умов. У той же час, завдяки особливостям штатної роботи радіолокаційних систем ближньої

дії, достовірність рішень, прийнятих для виявлення безпілотників навіть на «останній милі» їх фінішного виконання своєї місії, буде залежати апріорі від матеріальних джерел вимірювань $S_{\text{эф}}$ дронів (або їх моделей) і пов'язаних з ними помилок в задіяних системах, рівень гарантованих вимірювань яких можна оцінити тільки у безехових камерах [4].

Очевидно, що успішність досягнення заданих координат і наступного виконання польотного завдання БПЛА буде багато в чому визначатися властивостями його інформаційно-вимірювальної системи, яка зобов'язана володіти елементами інтелекту і відповідною системою захисту від несанкціонованих зовнішніх вторгнень з метою порушення штатної працездатності дрону, - аж до його знищення. При цьому, автопілот дрону (який забезпечує постійність штатних значень кутів крену, тангажу і ристання, швидкості, висоти і курсового направлення польоту) є виконуючою ланкою робототехнічного комплексу у системі управління і зв'язку дрону [5]. Такий автопілот є системою повного управління під час усіх фаз польоту, у той час як ряд функцій управління польотом можуть знаходитися на віддаленій станції керування. Автопілотна же частина системи управління дрону знаходиться на борту і, відповідно, аспекти надійності штатної його працездатності завжди є актуальними. Причому реальні системи стабілізації дронів використовують сучасні кіберфізичні системи (КФС), що реалізуються за допомогою сенсорних пристроїв отримання видової (чи радіолокаційної) інформації для сприйняття навколишнього середовища і уточнення локації, а також ряд виконавчих пристроїв, які забезпечують виконання алгоритму польотного завдання. Тому, в залежності від/за час виявлення потенційної атаки на дрон з метою перехвату його керування або ж фізичного його знищення, необхідно проводити ряд захисних заходів, у першу чергу у вигляді активно-пасивних впливів на демаскуючі ознаки дронів (ДОД). До таких доцільно віднести захисні заходи, у першу чергу направлені як на зміну $S_{\text{эф}}$ дрону, так і на його сукупність «блискучих точок» у вигляді «радіолокаційного портрету» шляхом активного або пасивного їх нівелювання.

У якості активних впливів на ДОД, наприклад, доцільно використовувати електромагнітні перешкоди шумоподібного гребінчатого зашумлення, виконуючого, з одного боку, роль захисного екрану, а з іншого – дозволяючого залишати незмінним частотний діапазон керування. Вибір оптимальних параметрів останнього, з одного боку, залежить від апостеріорного результату аналізу його сигнальної функції та відповідного об'ємного тіла невизначеності, а з іншого боку – дозволяє забезпечувати скритність штатного безперервного процесу забезпечення захисту дронів з позицій визначення, розрізнення та розпізнавання будь-яких порушень повітряного навколишнього середовища. При цьому можлива реалізація переходу на резервні частоти керування, враховуючи (використовуючи) «вікна прозорості» в амплітудно-частотній характеристиці гребінчатого фільтру на виході шумоподібного генератора перешкоди, чим блокується потенційна можливість підміни керування протиборною стороною, що здатна навіть (при малому рівні ймовірності перехвату керування) реалізувати «вікна прозорості» при використовуваній гребінчастій фільтрації. У якості пасивних впливів на ДОД існує можливість реалізації сукупності штирьових антен та/або кутових відбивачів, прихованих від початку штатно під стелсовою захисною оболонкою обтічника дрону, але здатних по команді зайняти бойову позицію.

1. Девід Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный подход = Computer Vision: A Modern Approach. — «Вильямс», 2004. — 928 с.
2. Yu.S. Tarasenko, V.Iu. Klym. Safety of critical infrastructure objects from the positions of risk effectiveness reduction. Vol. 4 No. 141 (2022): System technologies. Pp. 158-168. Published: 2023-03-04. Дніпро.

3. Тарасенко Ю.С., Савченко Ю.В. Ризик-орієнтовані процеси забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури // Системи та технології, 2023, 65 (1). С. 66-76.
4. Тарасенко Ю.С. Фізичні основи радіолокації [Текст]: навч. посіб. Т 19 / Ю.С.Тарасенко. – Д.: «Пороги», 2011. – 487с.
5. Летичевский А.А., Летичевский А.Ал, Скобелев В.Г., Волков В.А. Киберфизические системы. Кибернетика и системный анализ, 2017. Т. 53, №6. С. 3–19.

ПРО ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЕТАПІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.П. Пошивалов, Ю.Ф. Данієв

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України

Експлуатація технічних об'єктів (ТО) впливає на їхню надійність, особливо складних. Підтримка необхідного рівня надійності на етапі експлуатації передбачає проведення комплексу організаційно-технічних заходів, включаючи періодичність обслуговування, що сприяє попередженню відмов.

У процесі технічного обслуговування проводиться діагностика основних вузлів та блоків щодо відповідності їх заданим параметрам [1,2].

В результаті діагностики виявляються відхилення від заданих параметрів і приймається рішення про подальшу експлуатацію елемента або системи, а також про необхідність його ремонту або заміни. У період експлуатації найбільш важливими питаннями є планування та розрахунок періодів профілактики, а також розрахунок числа запасних елементів систем ТО. На етапі експлуатації важливим завданням є вибір показників надійності. Для цього використовуються показники надійності, що характеризують окремі властивості системи та комплексні показники. Крім цього застосовуються відносні показники, що характеризують загальний рівень надійності [3,4].

Надійність ТО залежно від їхнього виду може оцінюватися частиною чи всіма показниками надійності. Надійність ТО на етапі експлуатації характеризується такими властивостями:

- відновлювані ТО: безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю, збереженням.
- Невідновлювані ТО: безвідмовністю, довговічністю, збереженням.

У роботі наведено класифікацію показників надійності ТО на етапі експлуатації згідно з зазначеними властивостями, розглянуто методи розрахунку запасних елементів.

Розглянуто вибір розподілів наробітку до відмови для елементів ТО.

1. Пошивалов В.П., Данієв Ю. Ф. Безпека і залишковий ресурс технічних об'єктів / Міжнародна наукова конференція. Математичні проблеми технічної механіки – МПТМ-2023. Матеріали конференції.- Київ, Дніпро, Кам'янське – С.25

2. Про забезпечення надійності об'єктів ракетно-космічної техніки на етапі проєктування/В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв, Л. В. Резниченко, І. І. Телегіна // Технічна механіка. – 2020. – № 1. – С. 67 – 75.

3. Вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем / Ю. Ф. Даниев, В. П. Пошивалов, Л. В. Резниченко // Системні технології : Регіональний міжвуз. сб. наук. праць. – Дніпро: НМАУ, 2018. – Вип. 2 (115). - С. 53 - 60.

4 Development of the normative framework methodology for justifying the residual resource of starting buildings constructions of space launch vehicles / V. S. Hudramovich, V. N. Sirenko, D. V. Klimenko, Yu. F. Daniev, E. L. Hart //Strengths of Materials. – 2019. – V. 51, No. 3. – P. 333 – 340.

МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ В ЧИСЛОВИХ МЕТОДАХ З ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

А.В. Сохацький

*Інститут транспортних систем та технологій НАН України
Університет митної справи та фінансів*

Створення перспективних транспортних засобів, що працюють на нових фізичних принципах є надзвичайно складною проблемою. Необхідні розробки нових транспортних технологій. Подальший їх розвиток пов'язаний з формуванням нової інтегрованої транспортної системи в контексті концепції сталого розвитку, що передбачає перехід на екологічно чисті та безпечні технології. Необхідні ефективні рішення проблеми кардинального підвищення швидкості та пропускної здатності транспортних систем при малих витратах енергії. Крім традиційних вимог до безпеки, доступності та якості перевезень найбільш чітко проявляються вимоги до екологічності, мультимодальні та швидкості транспортних послуг, що надаються. Підвищення швидкості перспективних транспортних засобів вимагає ефективного розв'язування проблем, що пов'язані з динамікою руху та експлуатаційними характеристиками.

На сьогодні гостро стоять питання про надання перспективним транспортним засобам оптимальних аеродинамічних характеристик. Високошвидкісні транспортні засоби рухаються в суцільному повітряному середовищі для якого характерні невизначеності їх параметрів.

Реальний рух транспортного засобу відбувається в турбулентному повітряному середовищі. Моделювання турбулентних рухів повітряних мас є фундаментальною проблемою як теоретичної фізики так і практичної аеродинаміки. Відсутність універсальної теорії опису турбулентних течій створює проблеми з визначенням аеродинамічних навантажень]. Це питання є одним із ключових моментів при проектуванні високошвидкісних наземних транспортних засобів, оскільки при високих швидкостях руху тільки на подолання опору повітря може припадати до 90% загальних енергетичних витрат. Таким чином необхідні фундаментальні дослідження в аеродинаміці високошвидкісного наземного транспорту.

Методи моделювання турбулентних течій, з певною мірою умовності можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS); два класичних підходи - пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії.

На сьогодні найбільш поширеними підходами є методи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS). Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності.

Класичні вихоророзрізняючі підходи є найбільш досконалими. Це пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES). Метод DNS базується на безпосередньому прямому числовому розв'язуванні тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності. Він ґрунтується на фізичних принципах аеродинаміки і повністю вільний від емпіричних припущень.

У рамках методу LES ті ж рівняння розв'язуються безпосередньо після їх попередньої просторової фільтрації. Це дозволяє виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів. Проведена операція дозволяє значно понизити вимоги до просторово-часового розрізнення. Таким чином понижуються вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів.

Для урахування впливу відфільтрованих ("підсіткових") масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі.

В науковій літературі для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають "підсітковими".

До третьої групи відносять гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів в різних областях течії. Вони є найбільш розповсюдженими для практичного використання, виходячи з можливостей обчислювальної техніки.

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними Нав'є-Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії, що представляють основний інтерес в задачах аеродинаміки. Таким чином можна виключити необхідність розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса (DNS). В реальних умовах течії, на даний час розвитку обчислювальної техніки, проведення розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків вважаються абсолютно неможливими. Слід відзначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку. Тому для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху. Вони можуть бути отримані тільки з використанням тієї або іншої емпіричної інформації. Ці співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольдса або для других моментів.

ВПЛИВ ВКЛЮЧЕННЯ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ З ПРЯМОКУТНИМ ОТВОРОМ

Е. Л. Гарт, Б. І. Терьохін

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) – це нове покоління композиційних матеріалів [1], для яких характерна відсутність чітких меж між компонентами та безперервна просторова зміна (градієнт) фізико-механічних властивостей. Така особливість ФГМ дозволяє впливати на напружено-деформований стан з метою підвищення міцності конструкцій.

Застосування включень, зокрема із ФГМ, у тонкостінних конструкціях з отворами дає змогу зменшити коефіцієнт концентрації напружень (ККН) в їх околі [2, 3]. Важливим для механіки деформівного тіла є вирішення питання знаходження раціональних параметрів таких включень.

У цій роботі на основі методу скінченних елементів проведено комп'ютерне моделювання поведінки тонкостінної циліндричної оболонки, довжини L , діаметру d з центрально розташованим прямокутним отвором, розміром a , та кільцевим радіально-неоднорідним включенням радіусу r за дії одновісного рівномірного навантаження розтягу $p = \text{const}$, що не призводить до появи пластичних деформацій. Вважалося, що включення змодельоване вставкою, яка має однакову з оболонкою товщину; на межі включення із матрицею задані умови жорсткого зчеплення.

У числових розрахунках вибрано модельний матеріал з коефіцієнтом Пуассона $\nu_0 = 0,25$ та змінним модулем пружності ФГМ-включення. Як показано у [2], для зниження концентрації напружень доцільно використовувати закон зміни модуля пружності ФГМ-включення з трьома характерними зонами: 1) зона зростання ширини h_1 ; 2) зона незмінного (фіксованого) значення ширини h_2 ; 3) зона зменшення модуля пружності ширини h_3 . У розрахунках прийнято, що модуль пружності оболонки $E_0 = 100 \text{ МПа}$; коефіцієнт відносної жорсткості ФГМ-включення k , тобто відношення модуля пружності другої зони ФГМ-включення E_2 ($E_{\text{max}}^{\text{вкл}}$) до модуля пружності оболонки, $k=2$. Розглядали квадратний отвір зі стороною a . Ширину ФГМ-включення варіювали: $h_{\text{вкл}} = 3a/2, 2a$ (рис. 1).

Результати розрахунків ККН та відповідних деформацій наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнт концентрації напружень та відповідні деформації в оболонці з квадратним отвором і ФГМ-включенням

Вид включення	ККН	$\delta_1, \%$	$\varepsilon_i^{\text{max}} \cdot 10^4$	$\delta_2, \%$
ФГМ-включення 1 $h_{\text{вкл}} = 3a/2$	4,50	-24,4	2,61	-38,4
ФГМ-включення 2 $h_{\text{вкл}} = 2a$	4,29	-27,9	2,52	-40,5

Тут δ_1 і δ_2 – відхилення ККН і відповідних деформацій в оболонці з квадратним отвором і ФГМ-включенням від результатів для випадку оболонки без включення.

Як видно із табл. 1, використання ФГМ-включення ширини $h_{\text{вкл}} = 2a$ в циліндричній оболонці з квадратним отвором призводить до зменшення величини ККН в околі отвору на $\sim 28\%$, а максимальних деформацій на $\sim 41\%$. Збільшення ширини другої зони ФГМ-включення призводить до зменшення величини ККН і відповідних деформацій.

При порівнянні одержаних результатів для випадку наявності в оболонці ФГМ-включення із відповідними результатами для оболонки за наявності однорідних включень, мають місце значні переваги застосування саме ФГМ-включення: спостерігається механічний ефект зменшення як інтенсивності напружень, так і інтенсивності деформацій в зоні концентрації параметрів напружено-деформованого стану. Такого ефекту у разі застосування однорідних включень не відбувається.

Отже, у результаті проведеного числового дослідження поведінки тонкостінних циліндричних оболонок з квадратним отвором і кільцевим включенням із ФГМ проаналізовано вплив величини модуля пружності ФГМ-включення та його ширини на ККН в оболонці. Встановлено раціональні параметри радіально-неоднорідного ФГМ-включення, при якому ККН зменшується на ~28%, а відповідні деформації на ~41%.

Наявність ФГМ-включень з певними механічними властивостями і геометричними параметрами надає змогу впливати не тільки на величину ККН в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій поблизу локальних концентраторів напружень, а й на розподіл напружень по їх поверхні.

Література

1. Механика композитов. Т. 7. Концентрация напряжений / Гузь А. Н., Космодамианский А. С., Шевченко В. П. (ред.). – К.: “А.С.К.”, 1998. – 387 с.
2. *Hart E. L., Terokhin B. I.* Computer simulation of the stress-strain state of thin plates and cylindrical shells with a circular hole reinforced by an inclusion from functionally graded material // *Strength of materials and theory of structures*. – Kyiv: KNUBA, 2023. – Iss. 110. – P. 63–80. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.63-80>
3. *Yang Q., Cao H., Tang Y., Li Y., Chen X.* Experimental investigation of stress distributions in 3D printed graded plates with a circular hole // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 24, 7845. – P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247845>

ПРО КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО КРУГОВОГО ОТВОРУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ ЗА НАЯВНОСТІ ОТОЧУЮЧИХ ЙОГО ЕЛІПТИЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ

Е. Л. Гарт, О. Д. Шебанов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Тонкостінні елементи, такі як оболонки та пластини, широко застосовуються в різних сферах техніки, таких як ракетно-космічна промисловість, авіація, енергетика, будівництво та ін. У зв'язку з конструктивними та технологічними вимогами часто виникає необхідність введення різноманітних отворів та включень, що порушує суцільність матеріалу конструкції. Такі порушення призводять до неоднорідності структури, що суттєво впливає на розподіл напружень та процеси деформації та руйнування системи. Урахування впливу локальних концентраторів напружень на стан напружено-деформованого середовища, зокрема оболонок, і знаходження способів зниження концентрації напружень у тонкостінних конструкціях є важливим завданням механіки деформівного твердого тіла. Для вивчення цих явищ зазвичай використовують числові методи механіки, які, на відміну від аналітичних, є більш універсальними та ефективними для розв'язання такого класу проблем [3, 4].

У даній роботі досліджено напружено-деформований стан (НДС) тонкостінної циліндричної оболонки з малим круговим отвором і розташованими навколо нього двома еліптичними включеннями з іншого матеріалу. Розглянуто два варіанти розташування включень по відношенню до отвору – вертикальне та горизонтальне. Проведено скінченноелементний аналіз впливу відстані між отвором та включеннями, способом їх розташування, а також механічних властивостей включень на концентрацію параметрів НДС оболонки навколо отвору. Здійснено порівняння одержаних результатів із відомими даними для відповідних пластин [1].

Для зручності аналізу введено коефіцієнт відносної жорсткості включення k , (k – модуль пружності включення, E – модуль пружності оболонки). У табл. 1 наведено значення коефіцієнта концентрації напружень (ККН) для розглянутих двох випадків розташування еліптичних включень для різних варіантів відстані l ($l=8r$; $5r$; $3r$; $2,5r$) між круговим отвором радіусу r та «жорстким» ($k>1$) або «м'яким» ($k<1$) включенням.

Таблиця 1 – Значення ККН в залежності від способу розташування включень

Задача Відстань	Вертикальне розташування включень				Горизонтальне розташування включень			
	$k>1$		$k<1$		$k>1$		$k<1$	
	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %
$l=8r$	3,32	+2,0	3,13	-3,9	3,22	-1,1	3,28	+0,8
$l=5r$	3,44	+5,6	2,91	-10,7	3,07	-5,5	3,45	+6,1
$l=3r$	3,53	+8,5	2,63	-19,0	2,59	-20,4	4,01	+23,2
$l=2,5r$	3,50	+7,7	2,61	-19,6	2,08	-36,1	4,74	+45,8

Тут Δ – відхилення ККН (у %) для розглянутих випадків від величини ККН для циліндричної оболонки з круговим отвором без включень (ККН=3,25) [2].

Із розглянутих варіантів розташування включень навколо отвору найкращим з точки зору зменшення концентрації напружень виявився варіант їх горизонтального розташування у разі використання більш «жорстких» включень ($k>1$), що дало змогу зменшити величину ККН на ~36%. У разі більш «м'яких» включень ($k<1$) найкращим виявився випадок їх вертикального розташування, при цьому значення ККН можливо зменшити на ~20%. Ці результати добре узгоджуються для відповідної пластини [1].

У табл. 2 та табл. 3 наведено порівняння отриманих числових результатів розрахунку ККН оболонки і пластини з вертикальним та горизонтальним розташуванням включень відповідно.

Таблиця 2 – Порівняння ККН оболонки і пластини з вертикальним розташуванням включень

Задача Відстань	Вертикальні включення					
	$k > 1$			$k < 1$		
	$ККН_{пл}$	$ККН_{об}$	$\Delta, \%$	$ККН_{пл}$	$ККН_{об}$	$\Delta, \%$
$l=8r$	3,09	3,32	+7,4	2,89	3,13	+8,3
$l=5r$	3,19	3,44	+7,8	2,71	2,91	+7,8
$l=3r$	3,27	3,53	+7,9	2,51	2,63	+4,8
$l=2,5r$	3,29	3,50	+6,4	2,46	2,61	+6,1

Таблиця 3 – Порівняння ККН оболонки і пластини з горизонтальним розташуванням включень

Задача Відстань	Горизонтальні включення					
	$k > 1$			$k < 1$		
	$ККН_{пл}$	$ККН_{об}$	$\Delta, \%$	$ККН_{пл}$	$ККН_{об}$	$\Delta, \%$
$l=8r$	2,98	3,22	+8,05	3,07	3,28	+6,84
$l=5r$	2,92	3,07	+5,14	3,13	3,45	+10,22
$l=3r$	2,48	2,59	+4,44	3,61	4,01	+11,08
$l=2,5r$	2,01	2,08	+3,48	4,22	4,74	+12,32

Аналіз одержаних результатів показує, що кривизна оболонки найбільш суттєво (до ~12%) впливає на зростання ККН при горизонтальному розташуванні «м'яких» ($k < 1$) включень у порівнянні з відповідною пластиною.

На рис. 1, як приклад, наведено розподіл відносної інтенсивності напружень вздовж розгортки кругового отвору оболонки для випадку горизонтального розташування двох еліптичних включень для різних значень відстані l в разі «жорстких» ($k > 1$) включень. Для зручності було введено параметричну координату φ , що відповідає куту відносно горизонтальної вісі отвору. Лінії 1 – 5 відповідають таким випадкам: лінія 1 – оболонка без включень; лінії 2 – 5 – відстань між отвором та включенням $l=8r$; $5r$; $3r$; $2,5r$, відповідно. На графіку продемонстровано якісну картину зміни величини ККН за наявності в оболонці «жорстких» включень навколо отвору в залежності від відстані їх розташування відносно центру отвору. Спостерігається такий *механічний ефект*: зменшення відстані між отвором і включенням призводить до зменшення величини ККН. Отже, за розглянутих варіантів параметрів і розташування включень отримано, що конфігурація із найменшою відстанню $l=2,5r$ є найкращою з точки зору зниження концентрації напружень в оболонці в разі горизонтального розташування «жорстких» еліптичних включень (на ~36%). Перспективним є пошук

раціональних параметрів включень (їх форми, розмірів, кількості, механічних властивостей та розташування) щодо впливу на зменшення величини ККН.

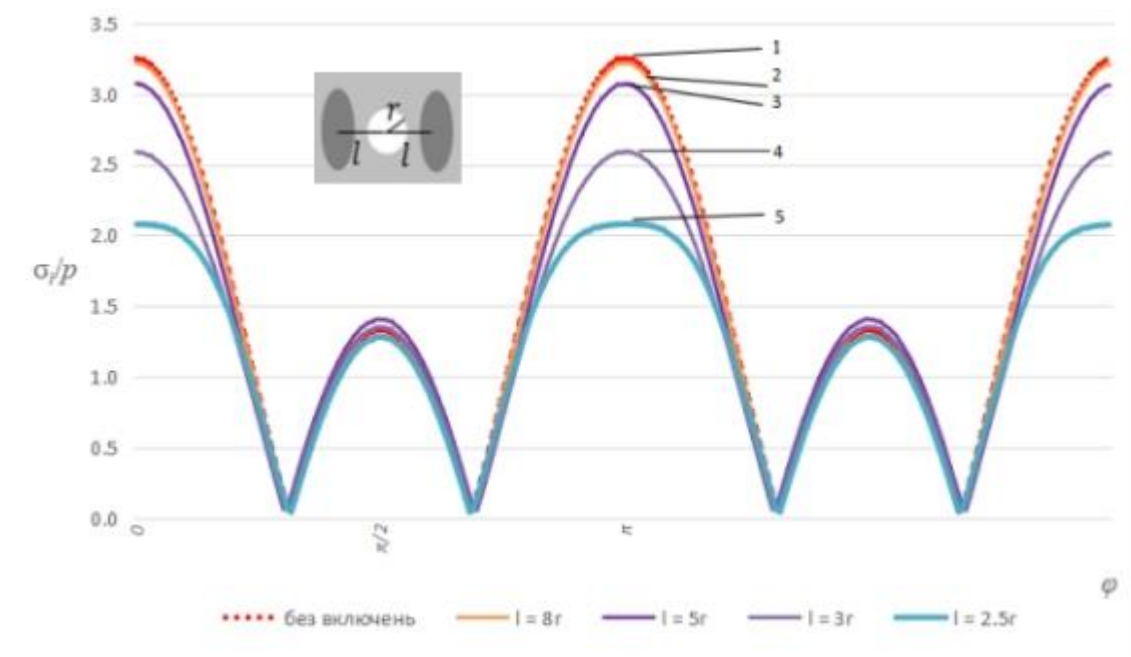


Рис. 1 – Розподіл вздовж розгортки кругового отвору оболонки при $k > 1$

Література

1. **Гарт Е. Л., Рибалко Я. В.** Взаємовплив кругового отвору і оточуючих його еліптичних включень при пружному деформуванні прямокутної пластини // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2019. – Вип. 30. – С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.15421/4219023>
2. *Методы расчета оболочек: в 5 т. Т. 1. Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями* / А. Н. Гузь, И. С. Чернышенко, Вал. Н. Чехов и др. – К.: Наук. думка, 1980. – 636 с.
3. **Gudramovich V. S., Gart É. L., Strunin K. A.** Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions // Materials Science. – 2017. – Vol. 52, iss. 6. – P. 768–774. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0020-z>
4. **Hart E. L., Hudramovich V. S.** Projection-iterative schemes for the realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions // Journal of Mathematical Sciences. – 2014. – Vol. 203. – No. 1. – P. 55–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-014-2090-x>

МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРТАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ З ОПОРОМ ПРУЖНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА З ПОРОЖНИНАМИ, ЯКІ МІСТЯТЬ РІДИНУ, У ВИГЛЯДІ СИСТЕМИ ДВОХ І ТРЕХ ПРУЖНО ЗВ'ЯЗАНИХ ТВЕРДИХ ТІЛ З РІДИНОЮ

Ю.М. Кононов

*Інститут прикладної математики і механіки НАН України,
Слов'янськ, Україна*

На підставі відомих рівнянь руху системи зв'язаних гіростатів П.В. Харламова і функції стану С.Л. Соболева розглянута задача про моделювання обертання у середовищі з опором вільного пружного твердого тіла з порожнинами, які повністю заповнені ідеальною нестисливою рідиною. Пружне тверде тіло з рідиною представлено у вигляді системи двох і трьох пружно зв'язаних твердих тіл з рідиною. Тверді тіла з'єднані пружними відновлювальними сферичними шарнірами або універсальними шарнірами (шарнірами Гука). У випадку двох ($n=2$) і трьох ($n=3$) гіроскопів Лагранжа з довільними осесиметричними порожнинами виведено трансцендентне характеристичне рівняння. З урахування основного тону коливання рідини отримано характеристичне рівняння шостого порядку для $n=2$ і дев'ятого порядку для $n=3$. На підставі критерію Ляпунова – Шіпара, записаного в інваріантному вигляді, виписані умови асимптотичної стійкості рівномірного обертання гіроскопів Лагранжа з рідиною. Поведені аналітичні дослідження цих умов. Розглянуті випадки відсутності рідини у одному, або у двох або у трьох твердих тілах, випадки відсутності пружності у шарнірах та випадки однакових твердих тіл з однаковими порожнинами і рідиною. Слід зазначити, що отримані умови стійкості є точними для еліпсоїдальних порожнин, а для всіх інших порожнин тільки наближеними. Доведено, що коли перші тони коливання рідин у порожнинах більші одиниці, то при зростанні коефіцієнтів пружності шарнірів завжди буде можлива асимптотична стійкість. Для еліпсоїдальних порожнин це означає, що вони повинні бути стиснуті вздовж осі обертання. Показано відсутність внутрішнього резонансу при збігу перших тонів коливання рідин у порожнинах.

У випадку пружних сферичних шарнірів характеристичні рівняння при $n=2$ і $n=3$ відповідно мають вигляд:

$$\begin{vmatrix} F_1 & \mu_1 \lambda^2 \\ \mu_1 \lambda^2 & F_2 \end{vmatrix} = 0 \text{ і } \begin{vmatrix} F_1 & \mu_1 \lambda^2 & \mu_2 \lambda^2 \\ \mu_1 \lambda^2 & F_2 & \mu_3 \lambda^2 \\ \mu_2 \lambda^2 & \mu_3 \lambda^2 & F_3 \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

а випадку пружних універсальних шарнірів –

$$\begin{vmatrix} F_1 & \mu_1 \lambda^2 - k_1 \\ \mu_1 \lambda^2 - k_1 & F_2 \end{vmatrix} = 0 \text{ і } \begin{vmatrix} F_1 & \mu_1 \lambda^2 - k_1 & \mu_2 \lambda^2 \\ \mu_1 \lambda^2 - k_1 & F_2 & \mu_3 \lambda^2 - k_2 \\ \mu_2 \lambda^2 & \mu_3 \lambda^2 - k_2 & F_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

$$\text{Тут } F_i = A_i \lambda^2 + (i\tilde{C}_i + D_i)\lambda + k_{i-1} + k_i - \lambda^2(i\lambda - \omega_0) \frac{E_{il}}{i\lambda - \tilde{\lambda}_{il}}, \quad E_{il} = \frac{2a_{il}^2}{N_{il}^2},$$

$$\tilde{\lambda}_{il} = \omega_0 - \lambda_{il} = \omega_0 \lambda'_{il}, \lambda'_{il} = 1 - \frac{2}{\kappa_{il}}, (k_0 = k_3 = 0), (i = 1, n),$$

$$A_1 = A_1 + m_1 m_{23} c_1^2 / m, A_2 = A_2 + (m_2 m_{31} c_2^2 - 2 m_2 m_3 c_2 s_2 + m_3 m_{12} s_2^2) / m, (3)$$

$$A_3 = A_3 + m_3 m_{12} c_3^2 / m, \mu_1 = m_1 c_1 (m_2 c_2 + m_3 s_2) / m, \mu_2 = m_1 m_3 c_1 c_3 / m,$$

$$\mu_3 = m_3 c_3 [m_1 s_2 + m_2 (s_2 - c_2)] / m, m = m_1 + m_2 + m_3, m_{ij} = m_i + m_j (n = 3),$$

а при $n = 2$ у коефіцієнтах (3) слід покласти масу третього гіроскопа з рідиною $m_3 = 0$ [1, 2].

Дослідження виконані в рамках конкурсної тематики НАН України № 2-19-П (науково дослідна робота за темою ВБ-15-18-21/479) та були частково підтримана грантом від Фонду Сімонса (Нагорода 1160640, Президентські дискреційні гранти на підтримку України, одержувач Кононов Ю.М.).

1. *Kononov, Yu.M. & Sviatenko, Ya.I.* Stabilization of spinning Lagrange gyroscope filled with ideal fluid in a resisting medium. *Int. Appl. Mech.* – 2023. – **59**, № 2. – P. 207 – 217.

2. *Кононов Ю.М.* Про стійкість обертання у середовищі з опором вільної системи трьох пружно зв'язаних твердих тіл. *Прикладна механіка* – 2024. – **60**, № 5.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВАЖЕНИХ ЗАЛИШКІВ ДО ЗАДАЧ ТЕРМООБРОБКИ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ ТІЛ

Є.М. Ірза

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача
НАН України*

Запропоновано методику розрахунку термонапруженого стану структурно неоднорідних тіл при термообробці. Розроблено числовий алгоритм розв'язання відповідних задач на основі методу зважених залишків в поєднанні з методом скінченних елементів.

Температурне поле й напружено-деформований стан тіла у процесі термообробки визначають параметри стану (θ – температура; σ – тензор напружень; $\epsilon(\vec{r}, \tau)$ – тензор деформацій; $\vec{u}$ – вектор переміщень), які пов'язані між собою, з фізичними і геометричними параметрами тіла та зовнішніми діями, заданими вектором силового навантаження та функцією теплового навантаження $h(\tau)$, системою рівнянь

$$L_i(\vec{r}, \tau, t, \theta, \sigma, \vec{p}, \vec{u}, h) = 0, \quad i = \overline{1, n_0}, \quad (1)$$

де через L_i позначено нелінійні інтегро-диференціальні оператори; τ – час; $\vec{r}$ – просторова координата.

Зазначимо, що в цю систему рівнянь назагал входять рівняння руху, геометричні співвідношення між деформаціями і переміщеннями, феноменологічні співвідношення,

які пов'язують компоненти тензорів напружень і деформацій, рівняння сумісності деформацій, початкові та крайові умови.

Оскільки система інтегро-диференціальних рівнянь (1) є нелінійною, а геометрична конфігурація області, яку займає тіло, часто є доволі складною, при розв'язуванні задачі виникає необхідність використання універсальних обчислювальних методів. Одним з таких методів є метод зважених залишків в поєднанні з методом скінченних елементів [1], особливо ефективний при розв'язуванні нелінійних задач в областях складної форми та структури.

Внаслідок виконання стандартної скінченно-елементної дискретизації у варіанті методу зважених залишків, вихідна система рівнянь (1) зводиться до системи рівнянь

$$\sum_{k=1}^{n_j} \int_{\Omega^{(k)}} \bar{L}_j(\tau, \{\mathbf{T}^{(k)}\}, \{\mathbf{U}^{(k)}\}, h(\tau)) d\Omega = 0, \quad j = \overline{1, n} \quad (2)$$

відносно невідомих значень температури і переміщень у вузлах скінченно-елементного поділу тіла.

Для відшукування розв'язку цієї системи рівнянь використовується сімейство багатопараметричних однокрокових різницьових алгоритмів, відповідно з яким весь часовий інтервал процесу термообробки послідовно проходять з постійним кроком (шукані значення параметрів стану в кінці кожного часового проміжку, $i = 0, 1, \dots$ визначають з використанням їхніх значень на початку проміжку; для першого часового шару використано початкові умови).

1. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Finite Element Method: Vol 1. The Basis. – London: “Butterworth Heinemann”, 2000. – 689p.*

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ КОМПОЗИТНОГО КОМБІНОВАНОГО ТОРОВОГО БАКА

В.І. Ліповський

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Огляд конструкцій торових баків, які були використані в літальних апаратах, що виконали свою місію, показав, що більшість з них виготовлені в металі. Як матеріал використовувалися алюмінієві та титанові сплави. Слід зазначити, що композитні матеріали мають значну перевагу, вони мають більше значення питомої міцності в порівнянні з металами. На жаль, композитні торові баки розробляються та існують в експериментальних тестових зразках. Перевага торових баків полягає у можливості створення компактного компонування літального апарату. Найбільш раціонально їх використовувати на другому або третьому ступені і в дорозгінних блоках ракет-носіїв. Основний розрахунковий випадок навантаження торового бака це навантаження внутрішнім тиском і гідростатичним стовпом рідини, посилений навантаженням при русі літального апарату. Однак використання композитних торових баків показує, що особливості геометрії та існуючі технології виготовлення не забезпечують створення рівномірних конструкцій. При навантаженні композитного тора внутрішнім тиском руйнування відбувається на зовнішній найбільш віддаленій від осі симетрії зоні, хоча в торі постійної товщини найбільші напруження виникають у зоні найближчої від осі симетрії [1]. Поверхня тора яка найбільш близька до осі симетрії має велику товщину

композитного шару через особливості геометрії та технології намотування. Особливістю композитного баку є необхідність враховувати вимоги герметичності. Умови міцності не завжди забезпечують вимоги герметичності. Ця особливість призводить до додаткового намотування 5-7 шарів або використання комбінованих лейнерних конструкцій [2,3]. У цьому випадку функцію герметичності виконує металевий лейнер, а композитне намотування силову функцію забезпечення міцності. Для лейнерних конструкцій не обов'язково використовувати суцільне композитне намотування по всій поверхні тора. Для створення рівномірної конструкції доцільно використовувати не суцільне поздовжньо-поперечне намотування, а намотування, що створює ізогридне підкріплення.

У роботі розглянуто інженерну методику розрахунку параметрів ізогридного композитного підкріплення комбінованої конструкції тора навантаженого внутрішнім тиском. Композитне підкріплення виконано поздовжньо-поперечним намотуванням. В основі розрахунку ізогридного підкріплення зроблено такі припущення:

- поперечне композитне намотування на лейнер виконується для випадку суцільного покриття внутрішньої, найбільш близької до осі симетрії поверхні тора стрічкою заданої ширини. Ширина стрічки визначається залежно від радіуса поперечного перерізу тора значення відстані між стрічками зовнішньої поверхні тора і розміру сітки по периметру зовнішнього радіуса тора;

- поздовжнє композитне намотування підбирається з умови можливої втрати стійкості лейнера на внутрішній найближчій до осі симетрії поверхні тора. Залежно від геометричних параметрів тора можлива локальна втрата стійкості у цій зоні. За цією умовою визначається розмір сторони поверхні частини лейнера, при якій можлива втрата стійкості. Цим параметром визначаються розміри криволінійної сітки композитного підкріплення тора. Розміри, а саме, висота прямокутного поздовжнього та поперечного сіткового підкріплення розраховуються з умови виконання рівнянь рівноваги та умови міцності за деформаційною теорією. Розраховані сіткові параметри композитного підкріплення дозволяють визначити вагу композитного бака та оцінити ефективність прийнятого конструктивного рішення.

Порівняння комбінованого торового бака з суцільною поздовжньо-поперечним намотуванням [1] і тора з ізогридним підкріпленням показує, що запропоноване конструктивне рішення забезпечує створення легшої на 25-30% конструкції.

Ключові слова: силова оболонка, комбінований композитний торовий бак, ізогридне підкріплення, поздовжньо-поперечне намотування.

1. И.М. Буланов, В.И. Смыслов, М.А. Комков, В.М. Кузнецов Сосуды давления из композиционных материалов в конструкторских летательных аппаратах: монография. М.: ЦНИИ информации, 1985. - 308 с.
2. Экспериментальное исследование безлейнерного топливного бака из полимерных композиционных материалов/ А. В. Сидорук, Д. А. Попов, А. С. Задоя та ін./ Space technology. Missile armaments: науч.-техн. сб. / Гос. предпр."КБ "Южное" им. М. К. Янгеля". – Днепр: 2020. Вып. 1 (119).С.90-98.
3. TSM YZH ANL 009 00. Композиционный топливный бак для РКН, Днепр, ГП «КБ «Южное», 2019. 146с.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ КРУГЛОМУ ШЛІФУВАННІ ДОДАТКОВИМ ЗМІЩЕННЯМ ОСІ

В.Ф. Молчанов, Д.В. Латишев

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

Основними напрямками розвитку машинобудування передбачено подальше підвищення точності, надійності і довговічності виготовлених виробів. Питання підвищення точності і надійності виробів вирішуються при одночасному зниженні термінів їх постановки на виробництво, автоматизації усіх виробничих процесів. Для підвищення точності і надійності виробів в машинобудуванні широко впроваджуються програмно-керовані верстати, гнучкі виробничі системи, роторні лінії, автоматичні дільниці і заводи. Для звичайних неавтоматизованих підприємств машинобудування при забезпеченні точності істотне значення мають робітник і наладчик, які налагоджують металорізальне устаткування і своєчасно усувають технологічні відмови. В умовах автоматизованого виробництва задана точність має бути забезпечена самою технологічною системою. Проблема забезпечення точності в цьому випадку є однією з найбільш складних. Для її вирішення необхідно виконати розробку спеціальних апаратурних засобів і систем керування технологічними операціями, створення нових підходів до аналізу процесів утворення поверхонь.

Метою дослідження є аналіз управління точністю обробки на шліфувальних верстатах [1].

Проведемо аналіз керування точністю обробки на шліфувальних верстатах. На операціях шліфування, широко поширених в машинобудуванні, відбувається кінцеве формування параметрів на точність.

Наявність у шліфованих деталей відхилень від співвісної (ексцентриситету) і радіального биття обумовлена такими головними причинами, як початкові похибки заготовок, похибки установки їх в пристосуванні, неточність верстата, технологічна спадковість.

Зниження радіального биття і ексцентриситету шляхом підвищення точності верстата, пристосування і зменшення початкових похибок заготовок не завжди дозволяє вирішити завдання стабільного досягнення необхідної точності обробки. Це обумовлено тим, що верстат і настановні елементи пристосування внаслідок їх зносу так чи інакше знижують свої характеристики точності. При використанні високоточного устаткування збільшуються і витрати на обробку. Такий шлях зменшення радіального биття і ексцентриситету шліфованих деталей, як підвищення жорсткості технологічної системи, не завжди ефективний. Це повинно бути обґрунтовано для конкретних умов обробки. Подібна оцінка може бути виконана на основі моделювання з використанням математичних моделей і запропонованого алгоритму для розрахунку параметрів точності деталей.

На рисунку 1 показано процес виправлення ексцентриситету ε_0 , відображений кривою лінією 1. Як видно з графіку, для виготовлення деталі з $\varepsilon_k = 0$ необхідно зробити нескінченно велике число обертів (проходів).

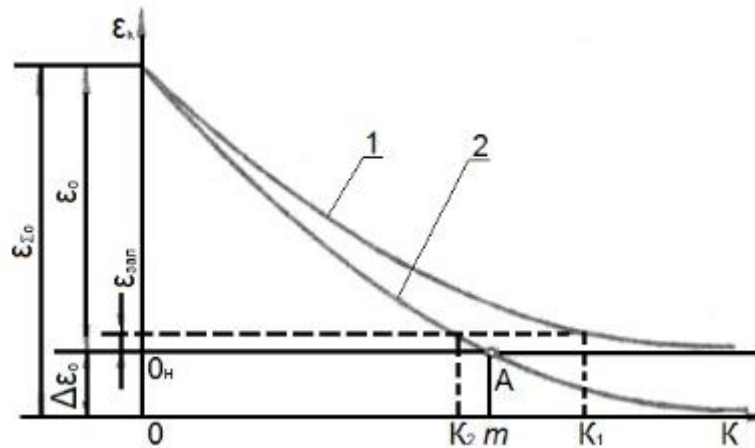


Рис. 1. Вплив числа виконаних проходів на величину залишкового ексцентриситету: крива 1 - без зміщення осей; крива 2 - з додатковим зміщенням осей

При шліфуванні запропонованим способом перед початком обробки утворюють додаткове зміщення осі зовнішньої поверхні деталі (точка 0_H) відносно осі обертання шпинделя передньої бабки круглошліфувального верстата 0 на величину $\Delta\epsilon_0$ (рис.1). Шліфувати при цьому необхідно до моменту досягнення ексцентриситетом $\epsilon_{\Sigma K}$ значення, рівного за величиною додатково створеному зміщенню осей $\Delta\epsilon_0$ (точка A).

З графіків видно, що для виправлення початкового ексцентриситету заготовки ϵ_0 при обробці зі зміщенням осей ($\Delta\epsilon_0 \neq 0$) потрібно менше число обертів (проходів) - точка K_2 , чим при обробці з поєднаними осями - точка K_1 ($\Delta\epsilon_0 = 0$). Прискорення процесу виправлення ексцентриситету при створенні додаткового зміщення осей обумовлене збільшенням знімання металу з боку більшого припуску за рахунок збільшення натягу в технологічній системі і зменшення знімання металу з боку меншого припуску.

Аналіз і порівняння даних показує, що застосування розробленого способу керування точністю обробки дозволяє прискорити процес виправлення похибок в 2-3 рази в порівнянні із звичайним шліфуванням. Наявність залишкового ексцентриситету деталей після обробки з додатково створеним зміщенням осей обумовлена похибками при проведенні експериментів і виникненням похибок, що утворюються в процесі шліфування.

Результати отриманих даних експериментів підтвердили правильність вибраних розрахункових залежностей і допущень.

Для реалізації розробленого способу у виробничих умовах може бути рекомендоване або попереднє сортування заготовок по групах з рівним початковим ексцентриситетом і наступна обробка з постійним додатковим зміщенням осей для кожної із груп, або оснащення верстата системою адаптивного керування.

Список джерел

1. Латишев Д.В., Молчанов В.Ф. Дослідження керування точністю обробки на шліфувальних верстатах / Збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції // за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2023. –319 с.

ПРО НАБЛИЖЕННЯ ФУНКЦІЙ ЛІНІЙНИМИ ОПЕРАТОРАМИ

О.М. Давидчик, І.О. Карпенко

Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Державного вищого навчального закладу «Українського державного університету науки і технологій»

Позначимо через z_n множину лінійних додатних операторів виду

$$U_n(f; x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+1) z_n(t) dt, \quad z_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \rho_k^n \cos kt, \quad z_n(t) \geq 0.$$

Припустимо $\delta > 0$, $r = 0, 1, 2, \dots$

$$L_r(U_n, \delta) = \sup_{f^{(r)} \in C/R} \frac{\|f - U_n(t)\|}{\omega(f^{(r)}, \delta)}. \quad \text{Тут } \omega(f^{(r)}, \delta) - \text{модуль безперервної ості функції } f(x).$$

Нехай $r = 2, 3, 4, \dots$ та

$$E(U_n, W^{r+1}) = \sup \{ \|f - U_n(f)\|_{W^{r+1}} \},$$

Тоді при $n \rightarrow \infty$

$$\inf \{ E(U_n, W^{r+1}) \mid U_n \in z_n \} = K_{r-1} \frac{\pi}{(2n)^2} + O\left(\frac{1}{n^2}\right), \quad \text{де } K_r - \text{константи Фавара.}$$

Якщо $K_n(t)$ – оператор Коровкіна, тоді

$$E(W^{r+1}) - E(K_n, W^{r+1}) = (1 - \rho_1^n(K_n)) \varphi_{r+1}^n(0) + O(1 - \rho_1^n(K_n)) = 4 - \frac{1 - \rho_2^n(K_n)}{1 - \rho_1^n(K_n)} = \frac{K_{n-1} \pi^2}{2n^2} + O\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІДЕАЛЬНОЇ СТИСЛИВОЇ РІДИНИ, ЩО ЗБУДЖУЄТЬСЯ СФЕРИЧНИМ СЕГМЕНТОМ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ПОРОЖНИНІ

І.В. Янчевський¹, О.Х. Остос²

¹Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, 03056, Київ, Україна, e-mail: i.yanchevskiy@kpi.ua

²Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАНУ,
вул. Нестерова, 3, 03057, Київ, Україна; e-mail: ostos.alexander@gmail.com

Дослідження динамічних процесів у рідині за наявності системи обмежувальних поверхонь становлять значний науковий і практичний інтерес. Врахуванню впливу поверхонь, які належать до одного координатного сімейства, присвячені численні публікації, частина яких відображена, наприклад, в [1, 2]. Вплив поверхонь різних координатних сімейств почали вивчати порівняно недавно. В [3] викладено методику побудови потенціалу швидкостей ідеальної стисливої рідини в нескінченній циліндричній порожнині з пульсуючою кулею, яка оснований на можливості розв'язання частинного розв'язку рівняння Лапласа, записаного в циліндричних (сферичних) координатах, по сферичних (циліндричних) гармонічних функціях. У статті [4] побудовано точний аналітичний розв'язок задачі про осесиметричні коливання

сферичного сегменту у круговій циліндричній порожнині з нестисливою рідиною. У даній доповіді ці результати розвинуто на випадок ідеальної стисливої рідини. Метою дослідження є отримання частотних залежностей для тиску та швидкості рідини для виявлення нових ефектів, обумовлених хвильовою взаємодією сферичного сегмента із границею порожнини.

Для розв'язання задачі вводяться сферична та циліндрична системи координат таким чином, щоб граничні поверхні порожнини та сегменту співпадали з координатними поверхнями зазначених систем. Швидкість та тиск рідини записуються через потенціальні функції, які моделюють процеси у внутрішній та зовнішній до сегменту розрахункових областях. Ці функції представляються як розв'язки рівняння Гельмгольца, враховуючи симетрію задачі відносно осі циліндричної порожнини. Граничні умови до задачі передбачають неперервність тиску та швидкості рідини на умовній межі розділення зазначених вище областей. З використанням запропонованого у публікації [3] підходу, який включає застосування теорем додавання гармонічних функцій, сформульована задача зведена до нескінченної системи алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої отримано методом усічення. Отримані співвідношення дозволяють визначати гідродинамічні параметри рідини в залежності від фізико-механічних та геометричних параметрів механічної системи. Проведено низку чисельних експериментів з метою виявлення особливостей акустичних процесів у циліндричній порожнині з рідиною та сегментом.

1. Жук О.П. Радіаційні сили акустичного поля в рідині з включеннями / О.П. Жук, О.М. Гузь, Я.О. Жук. – К.: Альянт, 2023. – 240 с.

2. Martin P.A. Multiple scattering: Interaction of time-harmonic waves with N obstacles // Encyclopedia of mathematics and its applications. – Vol. 107. – London: Cambridge University Press, 2006. – 437 p.

3. Kubenko, V.D., Dzyuba, V.V. The acoustic field in a rigid cylindrical vessel excited by a sphere oscillating by a definite law. Int Appl Mech 36, 779–788 (2000). <https://doi.org/10.1007/BF02681985>

4. Kubenko, V.D., Savin, V.A. Determination of the dynamic characteristics of an ideal incompressible liquid excited by a spherical segment in a cylindrical cavity. Int Appl Mech 31, 567–574 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF00846790>.

ПРО СТІЙКІСТЬ ОБЕРТАННЯ НА ПІДВІСІ ГІРОСКОПА ЛАГРАНЖА З ІДЕАЛЬНОЮ РІДИНОЮ

Ю.М. Кононов, О.В. Несмелова, Я.І. Святенко

Інститут прикладної математики і механіки НАН України, Слов'янськ

Розглянута задача про стійкість рівномірних обертань на підвісі гіроскопа Лагранжа з ідеальною рідиною у середовищі з опором та при відсутності дисипації. Динамічно та геометрично симетричні тверді тіла S_1 і S_2 пов'язані в точці пружним відновлювальним сферичним шарніром. Тіло S_1 (підвіс) має нерухому точку O_1 в якій на нього теж діє відновлювальний сферичний шарнір, а тіло S_2 має осесиметричну порожнину повністю заповнену ідеальною нестисливою рідиною. Тверді тіла S_i знаходяться під дією сил тяжіння, дисипативного моменту $M_i = D_i \omega_i$ ($D_i = \text{diag}(D_1, D_2, D_3)$ ($D_i > 0$)), що моделює

середовище з опором, а тіло S_2 також знаходиться під дією постійного моменту у неінерціальній системі відліку $M_q = Qe_3^2$. Цій постійний момент підтримують рівномірне обертання тіл S_i . Тут ω_i – кутова швидкість твердого тіла S_i , g – прискорення вільного падіння, e_3^i – орт, який спрямований вздовж осі симетрії тіла S_i . У незбуреному русі тверди тіла S_1 і S_2 та рідина обертаються навколо вертикалі з кутовою швидкістю $\omega = Q/D_3$. На підставі роботи [1] характеристичне рівняння збуреного обертання двох пружно зв'язаних гіроскопів Лагранжа, один із котрих має ідеальну рідину, запишеться так:

$$\begin{vmatrix} F_1 & \mu\lambda^2 \\ \mu\lambda^2 & F_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Тут $F_1 = A_1\lambda^2 + (i\tilde{C}_1 + D_1)\lambda + \tilde{a}_1g + k_1 + k_2$; $F_2 = A_2\lambda^2 + i\tilde{C}_2 + D_2 + \tilde{a}_2g + k_2 - \lambda^2(i\lambda - \omega) \frac{E_n}{n=1 i\lambda - \tilde{\lambda}_n}$; $\tilde{\lambda}_n = (1 - \lambda_n)\omega$; i – коефіцієнти пружності сферичних шарнірів; $\mu = s\tilde{a}_2$; $A_1 = A_1 + s^2m_2$; $A_2 = A_2$; $\tilde{a}_1 = m_1c_1 + m_2s$; $c_i = O_iC_i$; i – маса і центр мас тіла.

З урахуванням основного тону коливання ідеальної рідини λ_1 ($n=1$) рівняння (1) отримає вигляд:

$$a_5\lambda^5 + (a_4 + ib_4)\lambda^4 + \dots + (a_1 + ib_1)\lambda + a_0 + ib_0 = 0. \quad (2)$$

На підставі критерія Льєнара–Шипара, записаного в інваріантному вигляді, отримані умови асимптотичної стійкості у вигляді системи чотирьох нерівностей відповідно коефіцієнтів пружності шарнірів:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{31}\tilde{k}_1 + \tilde{I}_{30} > 0; \quad \tilde{I}_{53}\tilde{k}_1^3 + \tilde{I}_{52}\tilde{k}_1^2 + \tilde{I}_{51}\tilde{k}_1 + \tilde{I}_{50} > 0; \quad \tilde{I}_{75}\tilde{k}_1^5 + \tilde{I}_{74}\tilde{k}_1^4 + \dots + \tilde{I}_{71}\tilde{k}_1 + \tilde{I}_{70} > 0, \\ \tilde{I}_{97}\tilde{k}_1^7 + \tilde{I}_{96}\tilde{k}_1^6 + \dots + \tilde{I}_{91}\tilde{k}_1 + \tilde{I}_{90} > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{31}\tilde{k}_2 + \tilde{I}_{30} > 0; \quad \tilde{I}_{53}\tilde{k}_2^3 + \tilde{I}_{52}\tilde{k}_2^2 + \tilde{I}_{51}\tilde{k}_2 + \tilde{I}_{50} > 0; \quad \tilde{I}_{76}\tilde{k}_2^6 + \tilde{I}_{75}\tilde{k}_2^5 + \dots + \tilde{I}_{71}\tilde{k}_2 + \tilde{I}_{70} > 0, \\ \tilde{I}_{98}\tilde{k}_2^8 + \tilde{I}_{97}\tilde{k}_2^7 + \dots + \tilde{I}_{91}\tilde{k}_2 + \tilde{I}_{90} > 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Старші коефіцієнти, $\tilde{I}_{53}$, $\tilde{I}_{75}$ і $\tilde{I}_{97}$ із (3) мають вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{31} = f_3(A_2^*D_1 + A_1D_2) > 0; \quad \tilde{I}_{53} = D_2f_3^2 > 0; \quad \tilde{I}_{75} = D_2I_{53}(g_7 + h_7); \quad \tilde{I}_{97} = D_2^3\tilde{\lambda}_1^2f_3^2g_7h_7, \quad (5) \\ f_3 = A_2^*D_2 + \mu^2D_1 > 0; \quad g_7 = E_2\tilde{\lambda}_1(\tilde{\lambda}_1 - \omega) = E_2\lambda_1(\lambda_1 - 1)\omega^2; \quad h_7 = k_2 + \tilde{a}_2g > 0. \end{aligned}$$

Із (5) випливає, що коефіцієнти $\tilde{I}_{75}$ і $\tilde{I}_{97}$ будуть додатними при $g_7 > 0$ і $h_7 > 0$, тобто при $\lambda_1 > 1$ і $k_2 > -\tilde{a}_2g$.

Таким чином, коли точка підвісу знаходиться не нижче центру мас тіла S_2 ($c_2 = 0$) або нижче ($c_2 < 0$) і $k_2 > -\tilde{a}_2g$, то для довільних значень механічних параметрів системи і для довільної осесиметричної порожнини при збільшенні коефіцієнта пружності k_1 буде можлива асимптотична стійкість при $\lambda_1 > 1$.

Відповідно для коефіцієнта пружності k_2 із (4) слідує, що старші коефіцієнти, $\tilde{I}_{53}$, $\tilde{I}_{76}$ і $\tilde{I}_{98}$ отримують вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{31} = (A_2^*D_1 + A_1D_2)f_3 + \mu^2(D_1 + D_2)f_3 > 0; \quad \tilde{I}_{53} = f_3 + \mu^2(D_1 + D_2)f_3 > 0, \\ \tilde{I}_{76} = f_5^2 > 0; \quad \tilde{I}_{98} = D_2E_2\tilde{\lambda}_1^2\tilde{\lambda}_1(\tilde{\lambda}_1 - \omega)f_5^2 = D_2g_7f_5^2; \quad f_3 = A_2^*D_2 + \mu^2D_1 > 0, \quad (6) \\ f_5 = (A_1 - A_2^*)^2D_1D_2 + \mu^2(D_1^2 + D_2^2) > 0; \end{aligned}$$

Із (6) випливає, що коефіцієнт $\tilde{I}_{98}$ буде додатним при $g_7 > 0$, тобто при $\lambda_1 > 1$.

Таким чином, для довільних значень механічних параметрів системи і для довільної осесиметричної порожнини при збільшенні коефіцієнта пружності k_2 буде можлива асимптотична стійкість, коли перший тон коливання рідини більше одиниці.

У випадку відсутності дисипативного і постійного моментів корені рівняння (2) повинні знаходитися на уявній осі. В цьому випадку умови стійкості будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{31}k_1 + \tilde{I}_{30} &> 0; \quad \tilde{I}_{53}k_1^3 + \tilde{I}_{52}k_1^2 + \tilde{I}_{51}k_1 + \tilde{I}_{50} > 0; \\ \tilde{I}_{75}k_1^5 + \tilde{I}_{74}k_1^4 + \dots + \tilde{I}_{71}k_1 + \tilde{I}_{70} &> 0; \quad \tilde{I}_{97}k_1^7 + \tilde{I}_{96}k_1^6 + \dots + \tilde{I}_{91}k_1 + \tilde{I}_{90} > 0; \quad (7) \\ \tilde{I}_{31}k_2 + \tilde{I}_{30} &> 0; \quad \tilde{I}_{53}k_2^3 + \tilde{I}_{52}k_2^2 + \tilde{I}_{51}k_2 + \tilde{I}_{50} > 0; \\ \tilde{I}_{75}k_2^5 + \tilde{I}_{74}k_2^4 + \dots + \tilde{I}_{71}k_2 + \tilde{I}_{70} &> 0; \quad \tilde{I}_{910}k_2^{10} + \tilde{I}_{99}k_2^9 + \dots + \tilde{I}_{91}k_2 + \tilde{I}_{90} > 0. \quad (8) \end{aligned}$$

Старші коефіцієнти, $\tilde{I}_{53}$, $\tilde{I}_{75}$ і $\tilde{I}_{97}$ мають вигляд:

$$\tilde{I}_{31} = (A_2^* D_1 + A_1 D_2) f_3 > 0; \quad \tilde{I}_{53} = D_2 f_3^2 > 0, \quad \tilde{I}_{75} = 4a_5^2 (A_2^*)^3 h_7; \quad \tilde{I}_{97} = 4a_5^2 (A_2^*)^3 h_9,$$

$$h_7 = 3(k_2 + \tilde{a}_2 g) A_2^* + C_2^2 \omega^2 + 2(\tilde{\lambda}_1 - \omega) \omega E_1 - A_2^* \omega \tilde{\lambda}_1 + (A_1 \tilde{\lambda}_1 - \omega E_1)^2; \quad h_9 = 4A_2^* k_2^3 + h_{92} k_2^2 + h_{91} k_2 + h_{90}. \quad (9)$$

Із (9) слідує, що вирази h_7 і h_9 будуть додатними при досить великих значеннях k_2 і в цьому разі будуть додатними, $\tilde{I}_{53}$, $\tilde{I}_{75}$ і $\tilde{I}_{97}$. Таким чином, при досить великих значеннях коефіцієнтів пружності k_1 і k_2 будуть виконані нерівності (7).

Для коефіцієнта пружності k_2 із (8) слідує, що коефіцієнти, $\tilde{I}_{53}$, $\tilde{I}_{75}$ і $\tilde{I}_{910}$ мають вигляд: $\tilde{I}_{31} = 5a_5^2 (A_1 + A_2^*) > 0$; $\tilde{I}_{75} = 4a_5^2 (A_2^*)^3 h_7$; $\tilde{I}_{910} = 16a_5^2 h_7^2 > 0$, так як $h_5 = (3A_1^2 - 4A_1 A_2^* + 3A_2^{*2} + 10\mu^2) > 0$ і $h_7 = (A_1 - A_2^*)^2 + 4\mu^2 > 0$.

Таким чином, значення коефіцієнтів пружності шарнірів на умови стійкості дуже велике. Їх збільшенням завжди можна досягти виконання нерівностей (7) – (8) при $C_i > 0$ і $A_i > 0$ незалежно від наявності рідини та значень інших механічних параметрів системи.

Автори частково підтримані грантом від Фонду Сімонса (Нагорода 1160640, Президентські дискреційні гранти на підтримку України, одержувачі Кононов Ю.М., Несмєлова О.В. і Святенко Я.І. та грантом Науково-дослідної роботи молодих учених НАН України 2023-2024 № 01/03-2023 (Несмєлова О.В., Святенко Я.І.).

1. Kononov, Yu.M. & Sviatenko, Ya.I. Stabilization of spinning Lagrange gyroscope filled with ideal fluid in a resisting medium. *Int. Appl. Mech.* – 2023. – **59**, № 2. – P. 207 – 217.

ДОСЛІДЖЕННЯ БІМАТЕРІАЛЬНОЇ ОБЛАСТІ З ТРІЩИНАМИ МІЖ ДВОМА МАТЕРІАЛАМИ

Р.Р. Воеділо, В.В. Лобода

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто плоску задачу для системи колінеарних тріщини між двома прямокутниками. Тріщини мають довільну довжину та відстань між собою і вони вільні від напружень.

Спочатку в припущенні що область тріщини набагато менша характерного розміру розрахункової області задачу розв'язано аналітично. За допомогою представлень

напружень та стрибків переміщень через кусково-аналітичні функції проблему зводено до задачі лінійного спряження, завдяки розв'язку якої знайдено усі необхідні фактори на межі поділу матеріалів у тому числі швидкості звільнення енергії при розвитку тріщин.

У випадку області скінчених розмірів для чисельного моделювання задачі для колінеарних тріщин між півпросторами використано програмний комплекс Abaqus. Побудована сітка скінчених елементів, яка має згущення при наближенні до області тріщин і особливо до їх вершин. Використані восьмивузлові скінченні елементи ланранжевого типу. Проведені розрахунки на різних сітках та при різних степенях їх згущення. Розроблено алгоритм, який дозволив проводити якісну автоматичну перебудову сітки при зміні місць розташування тріщин, зокрема при зменшенні відстаней між ними.

Розглянуто конкретний приклад для системи трьох тріщин. Встановлено характер поведінки напружень та похідних від стрибків переміщень на різних частинах межі поділу матеріалів. Знайдені швидкості звільнення енергії біля вершин кожної з 3-х тріщин. Проаналізовано залежності вказаних факторів від механічних характеристик матеріалів, розміру та взаємного розташування тріщин, а також від інтенсивностей віддалених нормального та дотичного напружень. Результати представлено у вигляді таблиць та графіків. На їх основі, зокрема, показаний ріст швидкості звільнення енергії для вершини тріщини при наближенні до неї іншої тріщини.

На основі отриманих аналітичного і чисельного розв'язків проведено порівняння напружень, розкриття тріщини та швидкості звільнення енергії, отриманих різними методами. Хороше узгодження результатів підтверджує достовірність знайдених аналітичного і чисельного розв'язків.

Результати представлено у вигляді таблиць та графіків. На їх основі, зокрема, показаний ріст швидкості звільнення енергії для вершини тріщини при наближенні до неї іншої тріщини. З отриманих результатів, наведених, видно, що взаємне розташування тріщин суттєво впливає як на їх розкриття, так і на ШЗЕ. Але очевидно, що при зближенні ШЗЕ зростає набагато суттєвіше ніж стрибок переміщень берегів тріщини

ЗМІНА ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ У ВИБОЇ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ ВУГІЛЛЯ

В.В. Круковська, О.П. Круковський

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

Гідрообробка вугільних пластів водою застосовується для зниження викиднебезпечності вугільних пластів. Відомо, що вологонасичення призводить до зниження міцності і несучої здатності гірських порід, змінює характер їх поведінки після досягнення граничного стану. З урахуванням впливу зволоження на властивості вугілля було досліджено процес формування поля напружень в двох випадках: за природної вологості вугілля $w = 1\%$ і після гідрообробки пласта, коли $w = 4\%$ [1]. На рис. 1 показано результати розрахунків геомеханічних параметрів в момент часу $t = 50$ годин.

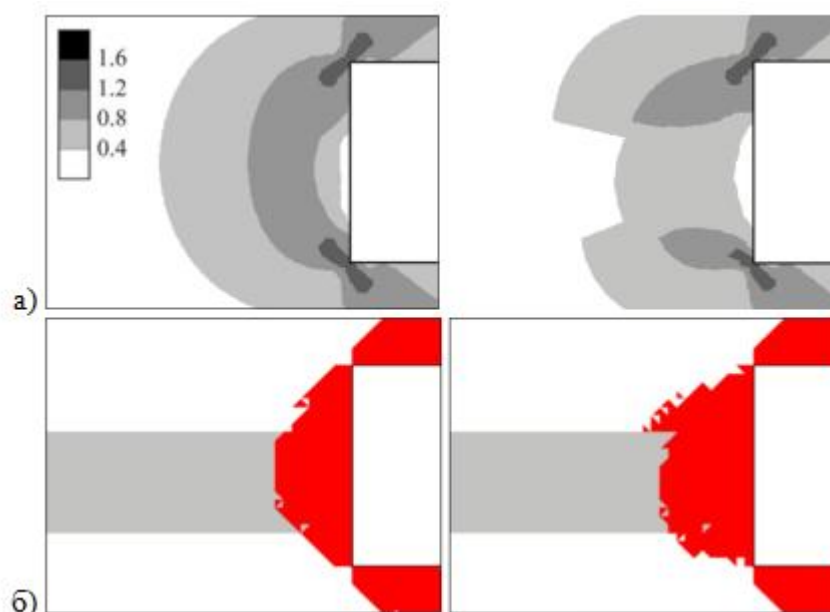


Рисунок 1 – Розподіли значень геомеханічних параметрів при вологості вугілля 1% (ліворуч) і 4% (праворуч): а) параметр $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / H$; б) зони непружних деформацій

Гідрообробка значно знижує різнокомпонентність поля напружень в привибійній зоні вугільного пласта. Через 20 годин після посування вибою значення параметра Q^* в зволоженому вугіллі в триметровій привибійній зоні в 1,5-5 разів менше, ніж в пласті з природною вологістю 1%. Зміна властивостей вугілля призводить до зниження рівня максимальної компоненти тензора головних напружень в привибійній зоні на 4-16%. Водночас значення зведеної мінімальної компоненти тензора головних напружень в зволоженому вугіллі зростають на 10-75% в різних точках пласта. Зона непружних деформацій після гідрообробки стає дещо більшою – при $t = 50$ годин вона зростає на 11%. Наведені результати відображують вплив деформаційного розвантаження і знеміцнення вугілля при його гідрообробці [2].

Література

1. Krukovska V.V., Krukovskyi O.P. (2023), Formation of the near-face stress field under the influence of natural and technological factors, Geo-Technical Mechanics, №165, p. 97-116. <https://doi.org/10.15407/geotm2023.165.097>
2. Круковский А.П., Круковская В.В., Усов О.А. (2020), Влияние обработки угля водой и антипирогенами на формирование поля напряжений вокруг горной выработки, Геотехническая механика, № 150, с. 116-126. <https://doi.org/10.15407/geotm2020.150.116>.

ЗАСТОСУВАННЯ СТАЛЕВИХ ТА ІН'ЄКЦІЙНИХ АНКЕРІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК В СКЛАДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

О.П. Круковський, В.В. Круковська

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

Збереження стійкості капітальних виробок протягом усього терміну експлуатації забезпечує безпечне виконання багатьох технологічних операцій і знижує витрати на підтримку виробки. Тому при їх проведенні в складних гірничо-геологічних умовах велике значення має вибір кріплення та обґрунтування технологічних параметрів його встановлення. За допомогою методів чисельного моделювання було досліджено процес формування породно-анкерного перекриття і стійкість виробки [1, 2], яку закріплено 7 сталевими анкерами, що встановлюються на третій часовій ітерації i , і 8 ін'єкційними, що встановлюються пізніше, при $i = 10$. Результати розрахунків показано на рис. 1.

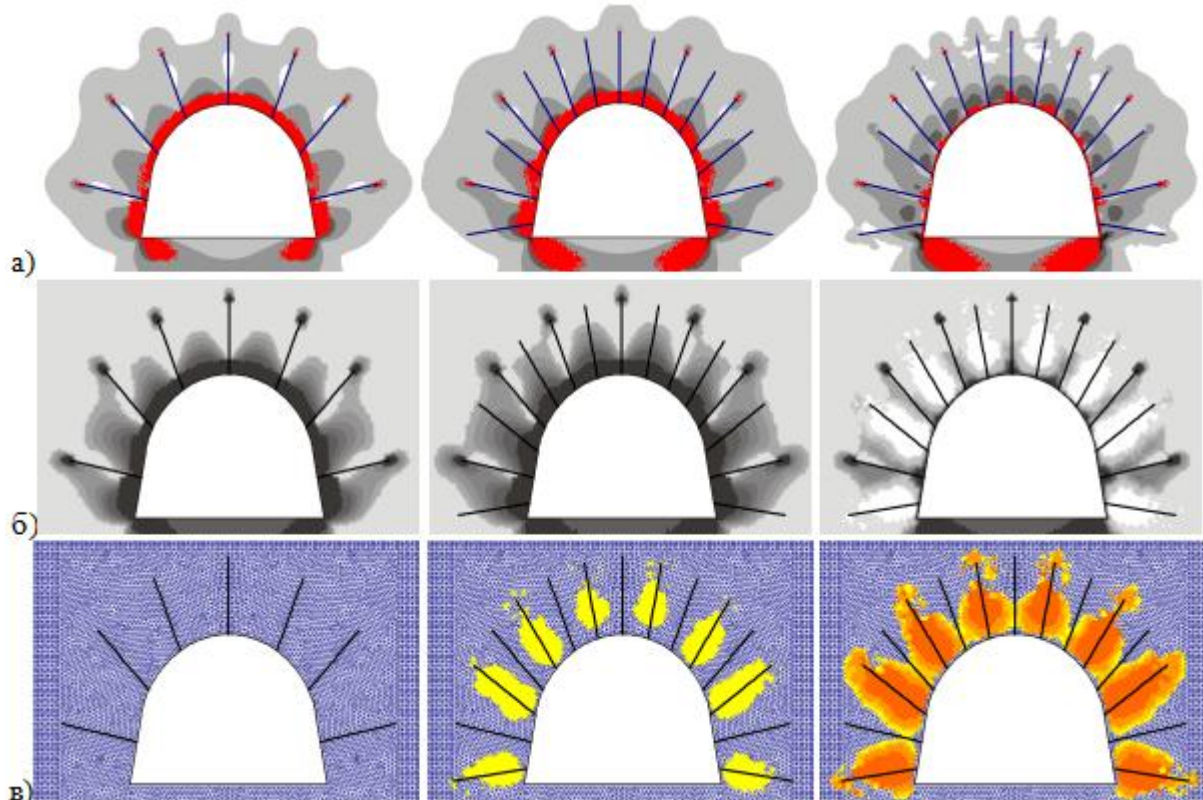


Рисунок 1 – Результати розрахунків: а) параметр $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / H$ і зони непружних деформацій; б) розподіл значень коефіцієнтів проникності; в) заповнення полімером тріщинного простору приконтурних порід в моменти часу $i = 4$, $i = 10$ та $i = 20$.

Показано, що сталеві та ін'єкційні анкери добре доповнюють один одного, підвищуючи стійкість виробки. Ін'єкційні анкери виключають можливість руйнування приконтурних порід і ефективно знижують їх проникність. Сталеві анкери краще стримують розширення зони підвищеної тріщинуватості.

Література

1. Krukovskiy O., Krukovska V., Kurnosov S., Demin V., Korobchenko V., Zerkal V. (2023), The use of steel and injection rock bolts to support mine workings when crossing

tectonic faults, IOP Conference, №1156. 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012024>

2. Круковская В.В., Круковский А.П. (2019), Численное моделирование связанных процессов, происходящих при нагнетании упрочняющего состава в трещиноватый массив с помощью инъекционных анкеров, Геотехническая механика, № 149, С. 100-110. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.100>

ПРО ВПЛИВ ЗМІНИ ПЕРЕРІЗУЮЧОЇ СИЛИ ВЗДОВЖ КОНТУРА ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ НА РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ В СФЕРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ

В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

В задачах концентрації напружень біля криволінійного отвору в тонкій сферичній оболонці під дією внутрішнього тиску p , як правило вважають, що кришка, яка перекриває отвір, передає на його контур тільки перерізуюче зусилля [1]. У випадку колового отвору радіусом r_0 це зусилля буде сталим і визначатиметься просто: $Q_k = pr_0/2$.

Для еліптичного отвору з півсями a і b (для означеності) площа кришки буде $S = \pi ab$; периметр – $L = 2\pi r_0(1 + \varepsilon^2/4 + \dots)$, де $r_0 = (a+b)/2$; $\varepsilon = (a-b)/(a+b)$. Тоді у випадку рівномірного розподілу перерізуючої сили вздовж контура отвору з точністю до , виражаючи a і b через r_0 і ε , будемо мати [2]

$$Q_k = \frac{pS}{L} \approx \frac{pr_0}{2} \left(1 - \frac{5}{4}\varepsilon^2\right). \quad (1)$$

У випадку змінної добавки, пропорційної відносній різниці площ еліпса й вписаного кола, поступаючи аналогічно [3], одержимо

$$Q_k = \frac{pr_0}{2} \left(1 - \frac{5}{4}\varepsilon^2 - 2\varepsilon(1-\varepsilon)\cos 2\gamma\right), \quad (2)$$

де γ – кут між радіусом-вектором точки на еліпсі в системі (ρ, θ) і перпендикуляром до дотичної;

Часто [1] змінну вздовж контура отвору перерізуючу силу задають формулою

$$Q_k = \frac{pr_0}{2} [1 - 2\varepsilon(1-\varepsilon)\cos 2\gamma]. \quad (3)$$

Строго кажучи, якщо отвір в оболонці утворено перерізом сфери радіусом R еліптичним циліндром з півсями a і b , то отримаємо неплоский еліпсоподібний контур. Це може привести до іншого розподілу перерізуючої сили та появи інших силових компонентів на контурі отвору. Крім того за значної еліптичності отвору довжину дуги його контуру необхідно обчислювати чисельно. Проте обмежимося аналізом напруженого стану для ряду невеликих значень параметра еліптичності $0,01 \leq a/b \leq 2$.

В результаті виконаних розрахунків [2, 4] напруженого стану тонкої оболонки ($R/h = 400$) з отвором ($r_0/h = 30$) виявлено ряд механічних ефектів. Найцікавішим є поява стиску на внутрішній поверхні біля широкої частини ($a/b = 1,5; 2,0$) отвору. Причому причиною стиску є значна еліптичність незалежно від розподілів (1-3) і наявності ($Q_k = 0$) перерізуючої сили. Тобто зі збільшенням еліптичності процес деформування

біля отвору змінюється від усебічного розтягу й згину, характерного для оболонки з круговим отвором, до переважно розтягу біля вузької частини отвору і вигину біля широкої.

Саме наявність перерізуючої сили (1-3) спричиняє переміщення максимальних напружень зі збільшенням еліптичності з зовнішньої на внутрішню поверхню оболонки біля вузької частини отвору. Крім того розподіл (2) викликає переміщення найбільших у всій оболонці напружень від широкої частини до вузької, чого не спостерігається за постійної перерізуючої сили (1).

Таким чином, можна відзначити, що зі збільшенням еліптичності отвору процес деформування в сферичній оболонці змінюється, асоціюючись з перетворенням оболонки з круговим отвором у конструкцію з прорізом. Проте зі збільшенням товщини оболонки вказані ефекти проявляються в меншій мірі.

Література

1. Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями / Гузь А.Н., Чернышенко И.С., Чехов В.Н. и др. – К.: Наук. думка, 1980. – 636 с. – (Методы расчета оболочек: В 5-ти т.; Т.1).
2. Maksimyyuk V.A., Mulyar V.P. Nonaxisymmetric deformation of open spherical shells with a curvilinear hole // *Int. Appl. Mech.* – 2008. – 44, N 5. – P. 555–561.
3. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – К: Наук. думка, 1968. – 888 с.
4. Maksimyyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Variational finite-difference methods in linear and nonlinear problems of the deformation of metallic and composite shells (review) // *Int. Appl. Mech.* – 2012. – 48, N 6. – P. 613 – 687.

TORSION, BENDING AND TENSION OF AN ELASTIC-PLASTIC ROD

K. Panin

Oles Honchar Dnipro National University

The problem of torsion, bending and tension of a prismatic rod with cross section of arbitrary shape is considered. It is accepted that material of a rod is elastic-plastic and hardening.

It is assumed that the lateral surface of the rod is free from external forces, and forces are applied to its ends that are statically equivalent to torque, bending moments and axial force as a functions of time. Volume forces are not taken into account.

It is accepted that under the influence of the indicated force factors, an axial deformation, uniform over the entire length, arises in the rod, consisting of deformation of the axis of the rod, bending strain, and deformation associated with torsion of the rod.

To solve the problem, the semi-inverse method is used, when the deformation of the axis of the rod, curvatures and the relative twist angle are given, and the parameters of the stress-strain state of the rod and the magnitude of the force parameters are determined already in the solution process.

An algorithm for solving a given problem is proposed, when differential-nonlinear relations of the plasticity theory taking into account micro-strains (Novozhilov, Kadashevich, Chernyakov) are used as the physical equations.

This differential non-linear variant of the plasticity theory is to be used in investigation of inelastic deformation of polycrystalline metals. In the theories of such a type no uniform plastic strains caused both by a granular structure of a polycrystalline and non-uniform distribution of damages is taken into account in an approximate way by presenting the tensor of plastic strain as a sum of unit plastic strains each of which has a correspondent yield surface and a correspondent system of internal forces.

Considering the fact that obtaining an analytical solution to such a problem causes significant mathematical difficulties, a transition has been made to the equivalent variational problem in order to obtain a numerical solution on its basis.

To solve the problem, a step method was used that reduces the solution of the original problem to a sequence of solutions for each step of time. Further at each step, using an iterative method similar to the method of variable elastic parameters, the nonlinear problem are reduced to a sequence of quasi-linear ones with defining relations, which are determined by the known velocity field at the previous iteration step. The finite element method is used at each iterative step. To calculate the stiffness matrices of finite elements, effective algorithms are proposed that allow decreasing the number of multiple integrals to be calculated in the defining relations of the theory of plasticity, taking into account micro-strains up to the dimensionality of the loading trajectory.

Calculations were carried out for rods of four various cross-sections under different external loading schemes.

The influence of the loading history on the configuration of plastic zones in the cross-section of the rods is investigated. It is shown that in some cases such influence can be significant. The obtained solutions are compared in the framework of the theory of plasticity, which takes into account micro-strains, with the results obtained by the deformation theory and the theory of flow with isotropic hardening.

In all calculations, the corresponding values of the power parameters such as torque moment, bending moments and axial force are also obtained.

ЕВОЛЮЦІЯ РУХУ ДИНАМІЧНО СИМЕТРИЧНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА З В'ЯЗКОЮ РІДИНОЮ ПІД ДІЄЮ ПОСТІЙНОГО МОМЕНТУ

Д.Д. Лещенко, Т.О. Козаченко

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Задачі динаміки твердих тіл, які мають порожнини з рідиною, привертають велику увагу. Інтерес до цих задач зріс у зв'язку з розвитком космічної техніки. Штучний супутник або космічний корабель в його русі відносно центра мас знаходяться під впливом моментів сил різної фізичної природи. Ці рухи можуть бути пов'язані з наявністю рідини в порожнинах, розташованих в тілі (наприклад рідкого палива або окиснювача в баках ракет). Аналогічні задачі мають місце також в теорії руху літака і корабля, а також в інших технічних питаннях. Ці задачі мають і принципове теоретичне значення. Необхідність дослідження задач динаміки твердого тіла з порожниною, яка містить в'язку рідину, пов'язана з дослідженням задач орієнтації та стабілізації космічних апаратів. Задачі динаміки твердого тіла з порожнинами, що містять в'язку рідину, є більш складними, ніж у випадку з ідеальною рідиною. Розв'язування задач динаміки твердого тіла з в'язкою рідиною в порожнині можна розділити на дві частини:

гідродинамічну та динамічну, що дозволяє спростити початкову задачу. Моменти сил в'язкої рідини в порожнині, які діють на тверде тіло, часто є відносно малими та можуть розглядатися як збурення. Природно застосовувати методи малого параметра для аналізу динаміки твердого тіла під дією прикладених моментів. В нашій роботі застосовується метод асимптотичного усереднення Крилова-Боголюбова.

При визначенні фактичної орієнтації штучного супутника Землі була відмічена мала зміна модуля вектора кінетичного моменту супутника на ділянці польоту з вимкненою системою орієнтації. Ця зміна була пояснена присутністю малого моменту збурення, який є постійним в зв'язаній з супутником системі координат.

В цій роботі розглядається рух відносно центра мас динамічно симетричного твердого тіла з порожниною, заповненою рідиною великої в'язкості, під дією постійного моменту в зв'язаних з тілом осях. Отримано систему рівнянь в стандартній формі. Одержані чисельні розв'язки задачі описують еволюцію руху твердого тіла під дією малих внутрішніх та зовнішніх моментів сил.

Ці результати дають можливість аналізувати рухи штучних супутників під дією малих збурюючих моментів. Асимптотичний підхід дозволяє одержати деякі якісні результати та описати еволюцію рухів, використовуючи спрощені усереднені рівняння. Одержані результати дають можливість виявити динамічні ефекти, зумовлені рідиною в порожнині і моментом, постійним в зв'язаних з тілом осях.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ, РОЗТЯГНУТОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНКИ З ОТВОРОМ

О. А. Дзюба, В. В. Гудзь

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Сучасні прикладні пакети скінчено-елементного аналізу надають широкі можливості для використання всього спектру засобів цього ефективного підходу. Це, зокрема, використання різної кількості, розмірів та типів скінчених елементів, згущення сітки в околі високих градієнтів зміни напружено-деформованого стану, а також вибору крайових умов, зокрема, умов взаємодії з іншими підконструкціями, врахування зовнішніх впливів та ін.

В поданій роботі приведені результати числового експерименту дослідження особливостей впливу вибору крайових умов та кількості скінчених елементів на результати розрахунку розтягнутої в своїй площині прямокутної пластини з довільно розташованим прямокутним отвором.

Проведено скінченно-елементний порівняльний аналіз розрахунку такої затиснутої по одній із кромок пластинки з довільно розташованим прямокутним отвором (люком), як фрагменту панелі міжступеневого відсіку ракети-носія. При цьому на протилежній кромці (при вільних бокових) цієї пластинки були прикладені:

- а) рівномірно розподілені напруження від навіщоючої маси вище розташованих конструктивних елементів;
- б) рівномірні по довжині кромки переміщення від жорсткого з'єднувального шпангоута вище розташованого відсіку.

Розрахунки для цих двох варіантів крайових умов, за відповідного узгодження величин рівномірного напруження для задачі а) та рівномірного переміщення для

задачі б), були проведені за різним по ширині пластинки розташуванням прямокутного отвору та кількості скінчених елементів.

Продемонстровано відмінність отримуваних значень та розподілу напружень в пластині для зазначених вище різних крайових умов однієї і тієї ж задачі за різної кількості скінчених елементів та різного розташування прямокутного отвору.

Наведені результати демонструють, що навіть за використання ефективних засобів розрахунку можливе отримання різних, в тому числі і помилкових, результатів.

Матеріали дослідження подані у вигляді картин розподілу напружень для різних варіантів розрахунку.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МІНІМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛУ В ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯДЕР СПАДКОВОСТІ В ЛІНІЙНІЙ ТЕОРІЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ

В.С. Ушакова¹, О.В. Ушаков²

¹Інститут механіки С.П. Тимошенка НАН України,

*²Інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки
України*

Більшість існуючих методів розв'язання задач лінійної в'язкопружності (метод перетворення Лапласа, операторні методи) базуються на використанні різних аналітичних виразів ядер повзучості та релаксації. Ці ядра повинні задовольняти ряду вимог, пов'язаних із забезпеченням необхідної точності розрахунків і з можливістю екстраполяції експериментальних даних. Важливою вимогою є реалізація простого та ефективного методу математичної обробки вихідних експериментальних даних при визначенні параметрів ядер.

Існує велика кількість аналітичних виразів для ядер повзучості та релаксації. Детальний аналіз структури ядер та способів визначення їх параметрів наведено у [1,2]. Найбільш перспективним, що допускає велику гнучкість при описі в'язкопружних властивостей реальних матеріалів, є дробово-експоненціальне ядро.

Слід відзначити, що дробово-експоненційна функція досить добре вивчена, вона табульована, встановлено її зв'язок з функцією Міттаг-Леффлера та іншими спеціальними функціями, а також для неї обґрунтована алгебра операторів Абеля. Основні труднощі залишаються при визначенні параметрів дробово-експоненційних ядер, оскільки ряд, що входить до аналітичного виразу ядра, є слабозбіжним.

В роботі розглянуто метод визначення параметрів ядер спадковості, що ґрунтується на мінімізації функціоналу, що побудований на підставі мінімізації квадратичного відхилення розрахункових значень ядра від дискретних.

Процеси довготривалого деформування лінійних в'язкопружних матеріалів за умови одновісного розтягу задаються рівняннями спадкової теорії Больцмана-Вольтерра в формі [1,2]

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{1}{E}(\sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau) \\ \sigma(t) = E\left(\varepsilon(t) + \lambda \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau\right), \end{cases} \quad (1)$$

Де $\varepsilon(t)$, $\varepsilon(\tau)$ – повна деформація, що включає пружну компоненту ε^e і деформацію повзучості $\varepsilon^c(t)$ в моменти часу t , і τ ; $\sigma(t)$, $\sigma(\tau)$ – напруження, що діють в моменти часу t і τ ; $K(t-\tau)$ – ядро повзучості;

$R(t-\tau)$ – ядро релаксації; E – модуль пружності; λ – реологічний параметр ($\lambda > 0$); t – час спостереження; τ – час, що передує моменту спостереження.

В роботі в якості ядра використовується дробово-експоненціальне ядро, яке має вигляд

$$K(t-\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-\tau)^{\alpha+(1+\alpha)n}}{\Gamma[(1+\alpha)(1+n)]} \quad (2)$$

Де α, β – параметри ядра, що визначаються з експериментів на повзучість ($1 > \alpha > 0, \beta > 0$); $\Gamma[\cdot]$ – гамма-функція.

Значення параметрів α, β і λ знаходимо з умови найкращого узгодження значень функції повзучості $J_k(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_k)}{\sigma_k}$, $k = \overline{1, m}$, яку називають податливістю матеріалу, з експериментальними даними для деякого фіксованого рівня напружень σ_k .

В якості критерію найкращого узгодження використовуємо умову мінімізації квадратичного відхилення розрахункових значень функції $J(t)$ від експериментальних

$$J_{exp}(t_j). \text{ Задача зводиться до знаходження мінімуму функціоналу} \\ F(\alpha, \beta, \lambda) = \sum_{i=1}^N \left\{ J_{exp}(t_j) - \frac{1}{E} \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-\tau)^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]} \right] \right\}^2, \quad (3)$$

де значення деформацій $\varepsilon(t_i, \sigma_k)$ заміряються в дослідах на повзучість при $\sigma_k = const$. В (4.4) прийнято, що $J_{exp}(t_i) = J_k(t_i)$, причому i задає число ділянок розбиття експериментальної кривої повзучості і відповідної їй кривої податливості.

СТІЙКІСТЬ МЕЖІ ПОДІЛУ СЕРЕДОВИЩ КУСКОВО-ОДНОРІДНОЇ ПІВПЛОЩИНИ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОЇ ПРИПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ

О.Л. Кіппніс

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ

В рамках тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл [1] досліджено задачу плоскої деформації про стиск напівобмеженого тіла вздовж тріщини, яка розташована на прямолінійній межі поділу двох компонентів зазначеного тіла: напівобмеженої основи та менш жорсткого по відношенню до неї тонкого покриття.

Відповідну крайову задачу, сформульовану в термінах потенціальних гармонічних функцій із застосуванням інтегральних подань Фур'є зведено до задачі на власні значення для системи інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду (і деякої додаткової умови), яка досліджується чисельно з використанням методу Бубнова – Гальоркіна. Зазначена система інтегральних рівнянь одержана в загальному випадку, коли обидва матеріали (основи і покриття) є стисливими або нестисливими високоеластичними матеріалами, для пружних потенціалів яких виконується умова рівності коренів відповідних характеристичних рівнянь.

Вивчено залежності значень критичного укорочення вздовж лінії поділу середовищ та критичного навантаження від відносної (віднесеної до довжини тріщини) товщини шару покриття та від фізико-механічних характеристик матеріалів.

Результати обчислень, які отримані для пружних матеріалів з потенціалом гармонічного типу і з потенціалом Бартенєва – Хазановича, показують, що при суттєвому збільшенні відносної товщини покриття значення критичних параметрів у випадку задачі про півплощину з міжфазною тріщиною між основою та покриттям асимптотично прямують до верхньої оцінки значень критичних параметрів, які отримуються в задачі про стиск кусково-однорідної площини вздовж однієї тріщини [2].

Сукупний аналіз одержаних результатів дозволяє зробити висновок про те, що при стиску кусково-однорідного напівобмеженого матеріалу з покриттям вздовж міжфазної приповерхневої тріщини у випадку, коли жорсткість матеріалу шару покриття є меншою за жорсткість матеріалу основи, реалізується механізм втрати стійкості аналогічний до того, що має місце, коли напівобмежене тіло є однорідним [3], і який пов'язаний з локальною втратою стійкості матеріалу біля тріщини та не пов'язаний з внутрішньою чи поверхневою втратою стійкості конструкційного матеріалу.

1. Гузь А.Н., Дышель М.Ш., Назаренко В.М. Разрушение и устойчивость материалов с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1992. – 456 с. (Неклассические проблемы механики разрушения в 4-х т., 5-и кн. Под общ. ред. А.Н. Гузя; Т.4, кн. 1).
2. Guz A.N., Guz I.A. The stability of the interface between two bodies compressed along interface cracks. 2. Exact solution for the case of equal roots // *Int. Appl. Mech.* – 2000. – **36**, N 5. – P. 615–622.
3. Nazarenko V.M. Two-dimensional problem of the fracture of materials in compression along surface cracks // *Sov. Appl. Mech.* – 1986. – **22**, N 10. – P. 970–978.

ON A NOVEL ANALYTICAL METHOD IN KINEMATICS OF PLANAR MECHANISMS OF II CLASS BY ARTOBOLEVSKY

S.V. Kykot¹, K.G. Khoroshev¹, K.O. Duchenko²

¹*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine;*

²*Technical University of Munich, Munich, Germany*

A novel analytical method for solving kinematical problems of planar mechanisms of the II class by Artobolevsky [1] is proposed. The approach is based on the decomposition of the mechanism of the II class into the mechanism of the I class and structural groups of the II class, which allows to apply a modular approach to the kinematics of the entire mechanism. The kinematic analysis of the I-class mechanism is a trivial mechanical problem, therefore,

the problem of the kinematics of the entire mechanism is reduced to determining the kinematic characteristics of the points and links of the structural groups that are part of it [1].

The following sequential analyzes can be considered: analysis of positions, velocities and accelerations of structural groups. In work [2], based on the Chase vector equation [3], an analytical approach to the positional analysis of structural groups of the II class according to Artobolevsky is proposed. The analysis of velocities and accelerations with the use of vector algebra methods was carried out in work [4]. Combining the results of works [2, 4], a unified analytical approach is developed for the kinematical analysis of the II class structural groups, and therefore, the II class mechanisms by Artobolevsky, which is based solely on the use of vector algebra tools. The main advantage of this approach is its simplified algorithmization and the absence of specification and determination of the angles of rotation of links, as it is customary when using well-known projection schemes for solving vector contour equations. It allows to ease the program code for computer modeling significantly. In terms of the simplicity of implementation, this approach can be compared with graphical methods of constructing diagrams of positions, velocities and accelerations.

As a demonstration of the proposed approach, complete kinematic analyzes of five-link mechanisms, which have two structural groups of the considered class, were carried out, with determination of radius-vectors, velocities and accelerations of all characteristic points of the mechanisms, as well as angular velocities and accelerations of the mechanism links. The following mechanisms were considered [5]: the sliding contact linkage multiplier (two TRT groups), the Kleiber sliding contact linkage for drawing ellipses (RTT and RRT groups), the sliding contact linkage with stops (RRR and RTR groups).

The obtained analytical relations of the kinematic characteristics of the points of the mechanism and the links of the structural groups are the basis for the following kinetostatic analysis of the mechanism.

1. Artobolevski I. Théorie Des Mécanismes Et Des Machines.– Moscou: Éditions Mir, 1977.– 651 p.
2. Khoroshev K., Duchenko K., Kykot, S. The direct vector approach to the position analysis of Assur dyads // Mechanism and Machine Theory.– 2024.– V. 195.– 105608
3. Chace M.A. Vector analysis of linkages // Journal of Engineering for Industry.– 1963.– V. 85, N. 3.– P. 289–297
4. Khoroshev K.G., Duchenko K.O., Kykot, S.V. The vector algebra approach to the kinematic analysis of the structural groups of the 2nd class by Artobolevsky // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physical and Mathematical Sciences.– 2023.– N. 2.– P. 160–163
5. Artobolevski I. Les Mécanismes Dans La Technique Moderne. Tome 2. Partie 1. Mécanismes À Leviers.– Moscou: Éditions Mir, 1976.– 720 p.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ДВОШАРОВОГО ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ТІЛА В УМОВАХ ПЛОСКОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається задача визначення полів переміщень, напружень і деформацій двошарової пружно-пластичної смуги кінцевих розмірів під дією абсолютно жорсткого

штампу прямокутної. Проведено розрахунки для різних умов контакту між шарами полоси: зчеплення або ковзання з можливим розшаруванням без урахування сил тертя при різних величинах осадки штампу Δ .

Використовуючи метод варіаційних нерівностей [1] задача визначення напружено-деформованого стану контакту багатошарових тіл з гладкими шарами, що зчеплені або між ними можливе проковзування та розшарування є еквівалентною задачі мінімізації функціоналу Лагранжа виду:

$$I(v) = \sum_{k=1}^2 \int_{\Omega_k} W_k(\vec{x}, \varepsilon_{ij}(\vec{x})) d\Omega_k,$$

де $W_k(\vec{x}, \varepsilon_{ij}(\vec{x}))$ – функція густини енергії деформації в точці $\vec{x}$ шару Ω_k на множині можливих переміщень $\vec{v}(\vec{x})$.

Розрахунок проведено у пакеті ANSYS Mechanical APDL [2] використовуючи метод скінченних елементів. Розглядалися два варіанта пакету: з більш м'який шар розташовано зверху та навпаки. Графіки $s \sim e$ наведено на рис. 1.

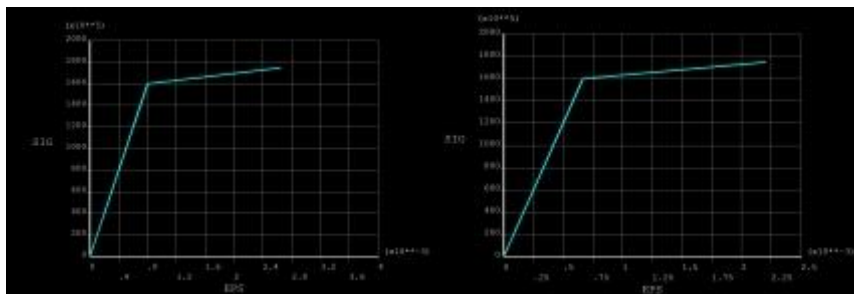


Рис.1 Графік залежності $s \sim e$ для матеріалу верхнього, більш м'якого (зліва) і нижнього, більш жорсткого (справа) шарів полоси

Модуль пружності матеріалу шарів $E_1 = 2.4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ та $E_2 = 2.0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, границя плинності дорівнює 160 МПа для обох матеріалів, дотичний модуль $E_{t1} = 8.0 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $E_{t2} = 9.6 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ (на рис. початковий порядок шарів). Для розрахунків використовувалась деформаційна теорія пластичності та умова плинності Мізеса [3].

На рис. 2 - 4 приведено деякі результати розрахунків, які показують вплив умов контакту шарів та механічних характеристик на напружений стан пакету.

Умови контакту між шарами вносять значні зміни у НДС, характер і величину зони полоси у якій виникають пластичні деформації. За умови ковзання з можливим відставанням між шарами тіла інтенсивність напружень зростає у площі під штампом у межах 15%. Розташування більш жорсткого шару під штампом збільшує як інтенсивність напружень, так і величину пластичної зони. Важливо відмітити що зменшення величини осадки штампі не призводить до відповідного зменшення пластичної зони.

Зменшенні осадки штампі з 5 мм до 2.5 мм зона пластичності зменшується лише на 10%. У порівнянні з $\Delta = 5 \text{ мм}$ максимальне додатне вертикальне переміщення при осадці у 4 мм зменшується з +3мм до +2.3мм (-23%) що корелює зі зменшенням штампі на 20%. При осадці у 2.5мм максимальне додатне вертикальне переміщення становить 1.3мм (-56%), а осадка зменшилась на 50%.

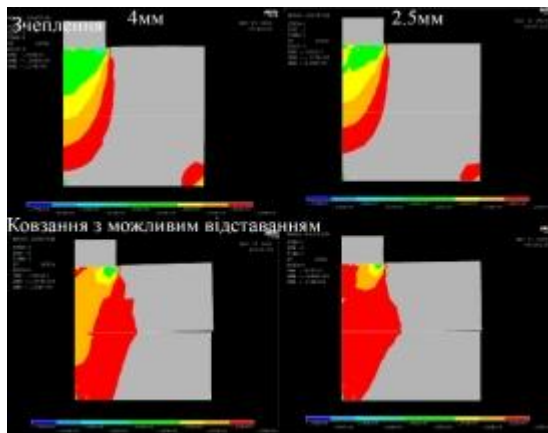


Рис.2 Зони пластичності для зчеплення і ковзання з можливим відставанням. Осадка штампу 4 і 2.5мм

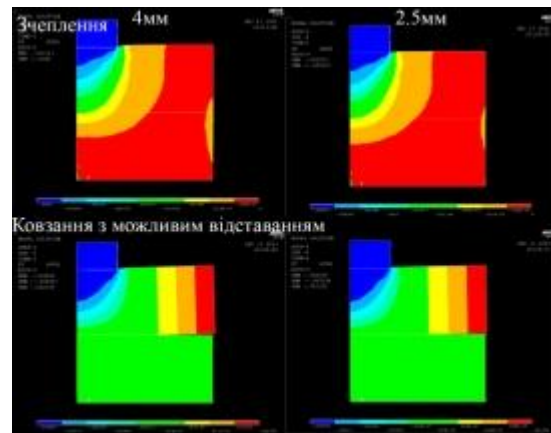


Рис.3 Вертикальні переміщення для зчеплення і ковзання з можливим відставанням. Обернене тіло. Переміщення штампу 4 і 2.5мм

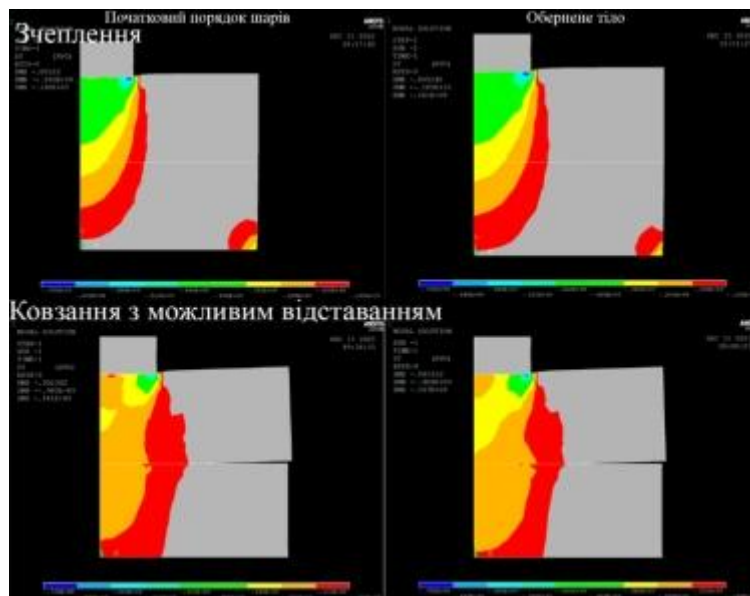


Рис.4 Порівняння зон пластичності для умов зчеплення і ковзання з можливим відставанням для різного порядку шарів. Переміщення штампу 5мм.

Список літератури

1. Чернецький С.О., Швайко М.Ю. Варіаційні принципи і математичні методи вирішення граничних задач для кусково-однорідних нелінійних середовищ //Мат. методи та фіз.-мех. поля. –1988. – Вип. 27.-С. 64-67.
2. ANSYS Mechanical APDL Verification Manual. Release 15.0. November 2013
3. Писаренко Г.С., Можаровський М.С. Рівняння та крайові задачі теорії пластичності і повзучості / К.: Наукова думка, 1989. – 493 с.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЧАСТКОВО ПРОЗОРИХ ТІЛ З ПОРОЖНИНАМИ ЗА ТЕПЛОВОГО ОПРОМІНЕННЯ

О.Р. Гачкевич, О.Б. Гуменчук, А. Козярска, Р.Ф. Терлецький

*Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України; Політехніка Опольська (Польща)*

Запропоновано модель радіаційної термомеханіки для опису та оптимізації зумовлених тепловим опроміненням теплових і механічних процесів за наявності відбивачів енергії випромінювання (як охолоджуваних, так і неохолоджуваних), конструктивних порожнин в розглядуваних частково прозорих для такого випромінювання тілах за різних властивостей середовища в цих порожнинах та способів врахування радіаційних властивостей матеріалу тіла, випромінювачів і відбивачів (спектральними чи інтегральними характеристиками). Вплив випромінювання на теплові та механічні процеси враховано через тепловиділення внаслідок поглинання матеріалом енергії теплового випромінювання та її перерозподіл в системі тіло-оточуюче середовище за рахунок наявних відбивачів променевої енергії (та їх нагрівання). При цьому враховано спектральні розподіли променевої енергії випромінювачів, а також спектральні радіаційні властивості матеріалів.

Сформульовано задачі радіаційної термомеханіки для частково прозорих тіл канонічної форми (шар, порожнисті циліндр та куля) за однорідного зовнішнього теплового опромінення. Побудовано основу на методах безпосереднього інтегрування та сіток методу розв'язування цих задач, в якій використано ітераційний процес знаходження потоків тепла на поверхнях тіла та відбивачів променевої енергії.

Виявлено нові дані про термомеханічну поведінку розглядуваних тіл за теплового опромінення в залежності від радіаційних властивостей конкретних матеріалів випромінювачів і відбивачів, а також властивостей середовища в наявних порожнинах. Розроблено теоретичні основи побудови раціональних режимів знегажування конкретних типів електровакуумних приладів, зокрема їх скляних оболонок, які ґрунтуються на використанні технологічного променевого нагрівання промисловими джерелами.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГРАФІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ У ТАБЛИЧНІ

П.Ю. Кобзар, А.Ю. Кобзар

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Важливою задачею механіки при побудові моделей різних фізичних процесів є визначення констант та коефіцієнтів в рівняннях моделей на основі базових

експериментів. Проблема полягає в тому, що більшість експериментальних даних запозичуються з літературних джерел, де вони часто представлені у графічному вигляді. Особливо актуальна проблема точності відтворення експериментальних даних при довготривалих процесах, наприклад при руйнуванні в умовах багатоциклової втоми. Відомо, що відхилення точності на 3-10% по напруженням може давати похибку по довговічності у 2-3 рази. Метою роботи є створення програмного застосунку, що перетворює графічні експериментальні дані, які представлені в різноманітних системах координат та системах одиниць, у числовий формат.

Розглядається двостадійна модель розповсюдження тріщин втоми в тонких ізотропних пластинах при одновісному асиметричному багатоцикловому розтягу-стиску система визначальних рівнянь якої має вид [1].

$$\begin{cases} n = n_* + \left(\frac{\pi}{4}\right)^{q-2} \frac{\left[\cos\left[\frac{\pi\sigma_m}{2\sigma_B}\right]\right]^{2\eta}}{(1+q^{-1})D(\sigma_Y)^{q-2}} \int_{\ell_0}^{\ell(n)} \left[\sigma_a f\left(\frac{h}{w}, \frac{\ell(n)}{w}\right)\right]^2 \ell(n)^{-1} d\ell, \\ n_* = \left[(1+q)D\left[\frac{4\sigma_Y}{\pi}\right]^q\right]^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

Система рівнянь моделі (1) містить три групи матеріальних констант, що підлягають визначенню із системи відповідних базових експериментів [2]. Перша група матеріальних констант містить межу короточасної міцності σ_B , яка визначається за результатами стандартних випробувань зразків матеріалу на одновісний розтяг. Друга група матеріальних констант містить коефіцієнти q та D , що характеризують опір втоми матеріалу за умов одновісного симетричного розтягу-стиску.

Задача визначення коефіцієнтів q та D зводиться до мінімізації функціоналу

$$\Phi(q, D) = \sum_{j=1}^S \left\{ n_{R_j}(\sigma_{n_j}) - \frac{1}{(1+q)D(\sigma_{a_j})^q} \right\}^2, \quad (2)$$

де σ_{a_j} , n_{R_j} – набір дискретних значень амплітуд циклічних напружень та відповідних їм чисел циклів до руйнування.

Третя група матеріальних констант містить показник степені η , що характеризує чутливість матеріалу до асиметрії циклу напружень. Значення η розраховуються за результатами обробки експериментальних даних на втому за умов асиметричних циклів навантаження для декількох комбінацій статичних σ_m та амплітуд циклічних σ_a напружень. Задача визначення показника степені η в (1) зводиться до мінімізації функціоналу

$$\Phi(\eta) = \sum_{j=1}^k \left\{ \left[\frac{\sigma_{a_j}}{\sigma_{n_j}(n_{R_j})} \right] - \left[\cos\left(\frac{\pi\sigma_{m_j}}{2\sigma_B}\right) \right]^\eta \right\}^2, \quad (3)$$

де σ_{a_j} , σ_{m_j} , σ_{n_j} , n_{R_j} – набір дискретних значень амплітуд циклічних напружень, середніх напружень, меж втоми за умов симетричного циклу напружень та відповідних їм чисел циклів до руйнування. У якості σ_{a_j} та σ_{m_j} можуть бути обрані значення $\sigma_{a_j} = \sigma_{m_j}$, що відповідають віднульовому циклу напружень.

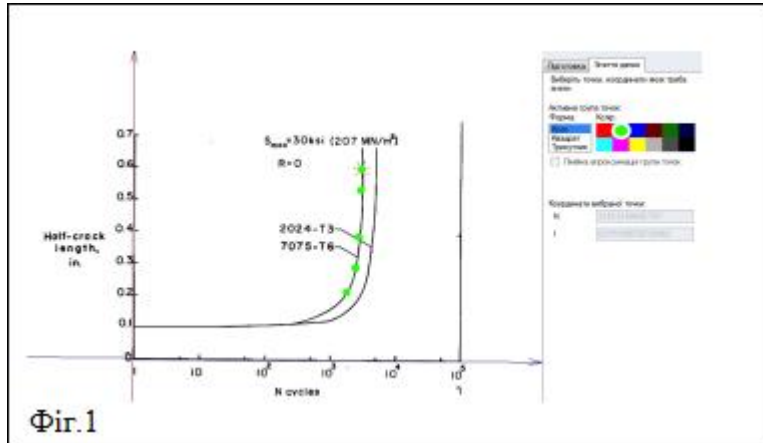


Fig. 1

Для вирішення задачі перетворення графічних експериментальних даних у табличну форму було розроблено програму VertexScanner (Сканер Вершин) (Fig.1). VertexScanner може знімати експериментальні дані з зображення графіків, що представлені в логарифмічній та лінійній шкалах. Програма шляхом встановлення

реперних точок на графіку за допомогою курсора позначає розташування ортогонального базису та вписує їх координати по осі абсцис та ординат. Ортогональний базис визначається через пошук вектора як сума квадратів векторів, що множиться на нульовий вектор по X та по Y, відповідно. В результаті визначається масштаб згідно кількості пікселів зображення, яким відповідає фізична величина, що є на графіку (наприклад мм чи будь-які інші розмірні величини). Таким чином, після побудови базису можна відмічати експериментальні точки на самому графіку. По відміченим даним на початку координат додається відстань в пікселях, що множиться на масштаб графіку.

Таким чином, VertexScanner є зручним інструментом для визначення коефіцієнтів кривої втоми, коефіцієнтів та констант матеріалів у визначальних рівняннях моделі розповсюдження тріщин, а також при оцінюванні адекватності моделі.

Для оцінки демонстрації роботи програми був вибраний набір експериментальних даних [3], що має також і табличне представлення. Порівняння результатів показує високу точність у роботі програми.

1. Golub V.P., Plashchynska A.V. Numerical modeling of fatigue crack in thin isotropic plates considering the damage accumulation history// Springer Nature Switzerland, Advances in Mechanics: Current Research Results of the NAS of Ukraine. – 2023. - P. 119-132.
2. Grover H.J., Hyler W.S., Kuhn P. Landers C.B. Hawell F.N. Axial-load fatigue properties of 24S-T and 75S-T aluminum alloys as determined in several laboratories // NACA TN 2928.- 1953.- 64 p
3. Hudson C.M. Effect of stress ratio on fatigue-crack growth in 7075-T6 and 2024-T3 aluminium alloy specimens”// NASA TN D-5390. – 1969. – 34 p.

ПРО СТІЙКІСТЬ БІМАТЕРІАЛЬНОГО ТІЛА З МІЖФАЗНИМ ДЕФЕКТОМ

І. Гергель

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Внаслідок технологічного процесу в шаруватому композитному матеріалі можуть виникати дефекти – тріщини, розшарування – на границі поділу матеріалів. Елементи конструкції з таких композитних матеріалів можуть знаходитися під дією стискаючого навантаження вздовж границь поділу, а наявність міжфазних тріщин може призвести до руйнування шляхом розкриття тріщин.

Розглядається плоска задача втрати стійкості пружного призматичного тіла, що складається із двох ортотропних шарів. Композит має центральний дефект на границі поділу матеріалів та затиснений між двома абсолютно жорсткими гладкими плитами. Таким чином, біматеріальне тіло знаходиться під дією зовнішнього стискаючого навантаження, паралельного вільним поверхням, яке призводить до однорідної деформації. Стискаюче навантаження збільшується і досягає деякого критичного значення, при якому матеріал біля міжфазної тріщини втрачає стійкість, що призводить до раптового розкриття тріщини.

Задача втрати стійкості розглядається в точній постановці в рамках тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл. За втрату стійкості композитного тіла з міжфазною тріщиною приймається розкриття міжфазної тріщини.

За допомогою інтегральних перетворень Фур'є проблема втрати стійкості шаруватого композита з міжфазною тріщиною зводиться до знаходження нетривіального розв'язку системи однорідних сингулярних інтегральних рівнянь типу Коші II роду з додатковими умовами.

Отримана задача на власні значення чисельним аналізом зводиться до системи $2n$ однорідних алгебраїчних рівнянь з $2n$ невідомими значеннями функцій нескінченно малих переміщень.

Критичне навантаження, тобто навантаження, при якому міжфазна тріщина раптово розкривається, визначається з умови, що визначник отриманої системи однорідних алгебраїчних рівнянь дорівнює нулю.

Досліджується вплив геометричних параметрів і властивостей матеріалів компонентів біматеріального тіла на значення критичного навантаження.

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХОМОЇ МІЖФАЗНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЬОВАНОЇ ТРІЩИНИ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ БІМАТЕРІАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ

О. Комаров

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто задачу про усталений рух електроізольованої тріщини між двома п'єзoeлектричними матеріалами, проаналізовано випадки виникнення різних видів

особливостей при вершині в залежності від швидкості руху й напрямків поляризації матеріалів.

Довжина тріщини вважається скінченною (модель Іоффе), рух є усталеним і відбувається під дією зосередженого навантаження, що рухається разом з тріщиною і прикладене до берегів тріщини в ортогональній фронті тріщини площині. Напрямок попередньої поляризації обох матеріалів також перпендикулярний до фронту тріщини. Вихідною системою рівнянь є рівняння руху для п'єзоелектричного середовища, визначальні співвідношення, що зв'язують механічні напруження і електричну індукцію з деформаціями й електричною напруженістю, залежності між деформаціями та переміщеннями і між електричною індукцією та електричним потенціалом.

Швидкість руху є докритичною, тобто такою, що не перевищує мінімальну з двох швидкостей поверхневих хвиль Релея або Гуляєва-Блюстейна. У цьому випадку рівняння руху являють собою систему рівнянь у частинних похідних еліптичного типу, для розв'язку якої можна використовувати підхід узагальнених комплексних потенціалів, запропонований та розвинений в роботах Ліхницького, Ешелбі та Строха. Побудовано матрично-векторні представлення для напружень і електричної індукції, для стрибків переміщень і електричного потенціалу через вектор-функції, голоморфні у всій комплексній площині, за винятком області тріщин. Задовольняючи з використанням цих представлень умови на краях тріщини, сформульовано систему задач лінійного спряження з відповідними умовами на берегах тріщини для якої отримано аналітичні розв'язки, використовуючи які отримано представлення для компонентів електро-напружено-деформованого стану на інтерфейсі.

Показано, що в залежності від кута попередньої поляризації складових матеріалів, існує певне, менше за критичне, значення швидкості руху, при якому має місце перехід від ступеневої особливості в розв'язку (з дійсним, не рівним 0,5 показником) до осцилюючої особливості, більш характерної для міжфазних тріщин. Тобто, для отримання розв'язку на всьому проміжку зростання швидкості необхідно застосовувати дві моделі: модель відкритої тріщини та модель тріщини з зоною контакту біля вершини.

В якості параметрів руйнування були обрані коефіцієнти при особливостях для функцій напружень і електричної індукції і швидкість вивільнення енергії, вирази для яких отримані в замкненій формі. Чисельна реалізація алгоритму була проведена на прикладі біматеріального простору, що складається з двох п'єзоелектричних керамік: PZT-4 і PZT-5. Результати обчислень показують, що при прямуванні значення швидкості руху до величини, при якій відбувається зміна характеру особливості, коефіцієнти при особливостях прямують до нескінченності, натомість значення швидкості вивільнення енергії залишається скінченим і, взагалі, перехід від відкритої моделі тріщини до моделі з зоною контакту не порушує монотонне її зростання до необмежено великих значень при швидкостях наближених до критичної.

МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕРМОМЕХАНІКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕВИХ ТІЛ ПРИ НАГРІВІ ЗА ВРАХУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ

О.Р. Гачкевич, Т.В. Козакевич, Т. Волчанські

*Інститут прикладних проблем механіки та математики НАН України (Україна);
Політехніка Опольська, Освітньо-навчальне об'єднання в Глушині (Польща)*

Актуальною є розробка математичних моделей термомеханіки, які дозволяють дослідити тепловий та напружений стани у сталевих виробах, зокрема, у пластинчастих елементах конструкцій, у процесі технологічного високотемпературного нагріву з метою отримання раціональних режимів термообробок, а також покращення їх експлуатаційних властивостей за врахування структурних залишкових деформацій.

Зміна структури сталей відбувається при різних операціях термічної обробки і робить свій внесок у зміну властивостей сталей. Як правило, розглядають такі основні фази при теплових впливах (нагріві – охолодженні): аустеніт, мартенсит, бейніт, ферито-перліт. Перехід однієї фази до іншої визначається різницею їхньої вільної енергії, а критичні точки є точками рівності вільних енергій співіснуючих фаз. Саме поліморфні перетворення в залізі визначаються перебудовою решіток об'ємно – центрованої кубічної ґратки при нагріванні в гранецентровані кубічні ґратки, і навпаки при охолодженні.

Через моделювання та визначення просторового неоднорідного фазового складу при охолодженні та зумовлених ним залишкових напружень у сталевих тілах при локальному високотемпературному нагріві, ми можемо проводити їх оптимізацію з метою отримання певних механічних властивостей тіл і рівня залишкових напружень.

Визначення залишкового напруженого стану розглядуваних сталевих пластин проводимо на основі розв'язування відповідної задачі термомеханіки, сформульованої відносно переміщень. Тут вихідною є залишкова деформація, яка зумовлена різним відсотковим вмістом фазових складових (при різних їх густинах), що виникають при структурному перетворенні, викликаному термічною обробкою. Відповідно до принципу адитивності деформація, викликана різним відсотковим змістом наявних фазових складових (при їх питомих об'ємах) $\varepsilon_a = \eta_M \xi_M + \eta_B \xi_B + \eta_{FP} \xi_{FP}$, де $\xi_M = 0,01 \cdot M$ (відсотковий вміст мартенситу), $\xi_B = 0,01 \cdot B$ (– бейніту), $\xi_{FP} = 0,01 \cdot FP$ (– ферито-перліту). Ця деформація відповідає, при врахуванні відомих експериментальних даних [1], зміні питомого об'єму вихідного ферито-перліту $V_{FP} \equiv 1 / \rho_{FP} = 0,1274 \cdot 10^{-3}$, м³/кг, де ρ_{FP} – густина ферито-перліту) при аустенізації та наступній зміні питомого об'єму утвореного аустеніту на відсоткові об'ємні частини: мартенситу ($V_M \equiv 1 / \rho_M$, де ρ_M – густина мартенситу), бейніту ($V_B \equiv 1 / \rho_B = 0,1277 \cdot 10^{-3}$, м³/кг, де ρ_B – густина бейніту) і ферито-перліту ($V_{FP} = V_{FP}$ вихідного).

З використанням відомих матеріалознавчих аспектів опису структурних змін при високотемпературному нагріві і наступному монотонному охолодженні сталевих тіл сформульовано варіант комплексної задачі термомеханіки маловуглецевих низьколегованих сталевих тонких пластин при нагріві рухомими розподіленими джерелами тепла за врахування фазових змін, яка складається з чотирьох відповідних підзадач:

1. О. Гачкевич, Т. Козакевич, Т. Волчанські, В. Кукареко. Вибрані матеріалознавчо-математичні аспекти при визначенні залишкових структурних та напружених станів сталевих пластин при нагріві та охолодженні// Manufacturing processes. Actual Problems – 2021 Vol. 1: Basic science applications in manufacturing processes. Studia i monografie z. 493 (ISBN 978-83-66033-23-8, pod red. nauk.: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański). Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2021. Глава 6. – С. 97-122.

ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ ПРУЖНОЇ ОСНОВИ І ТРИШАРОВОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕРІЗУ З РЕБРИСТИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

А.В. Лисенко, Є.А. Сторожук

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Тришарові оболонки знаходять широке застосування в різних галузях сучасної техніки, промисловому і цивільному будівництві.

В даній роботі розглядається тришарова циліндрична оболонка еліптичного поперечного перерізу з дискретним поздовжньо-поперечним ребристим наповнювачем, яка взаємодіє з пружною основою Вінклера [1] і знаходиться під дією нестационарного поверхневого навантаження. Розрахункова схема вихідної конструкції представлена на рис. 1.

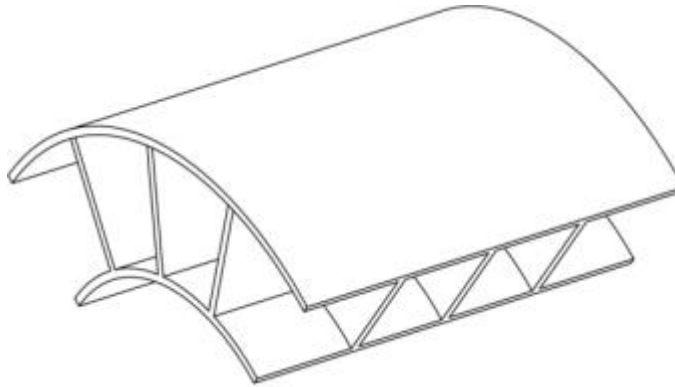


Рис. 1 – Тришарова циліндрична оболонка з ребристим наповнювачем

Віднесемо дану конструкцію до криволінійної ортогональної системи координат α_1, α_2, z , де координатні лінії α_1, α_2 збігаються з лініями головних кривизн серединних поверхонь оболонок (обшивок), а координатна лінія z напрямлена по нормалі до цих поверхонь.

Вирази для коефіцієнтів першої квадратичної форми і кривизн координатних поверхонь вихідних оболонок мають такий вигляд:

$$A_1 = 1; A_2 = (a_k^2 \cos^2 \alpha_2 + b_k^2 \sin^2 \alpha_2)^{1/2};$$

$$k_1 = 0; k_2 = a_k b_k (a_k^2 \cos^2 \alpha_2 + b_k^2 \sin^2 \alpha_2)^{-3/2}; k = 1, 2. \quad (1)$$

Тут a_k, b_k – півосі еліпсів, які характеризують поперечні перерізи відповідних циліндричних оболонок.

Рівняння нестационарних коливань тришарової циліндричної оболонки еліптичного поперечного перерізу з поздовжньо-поперечним ребристим наповнювачем, яка знаходиться на пружній основі, одержимо з варіаційного рівняння принципу Гамільтона – Остроградського [1].

Після стандартних перетворень в варіаційному рівнянні з врахуванням виразів для потенціальної і кінетичної енергій обшивок і ребер згідно теорії типу С.П. Тимошенка [1, 2] отримуємо дві групи рівнянь:

– для внутрішньої ($k = 1$) і зовнішньої ($k = 2$) обшивок

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{11}^k}{\partial s_1} + \frac{\partial S^k}{\partial s_2} &= \rho_k h_k \frac{\partial^2 u_1^k}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial S^k}{\partial s_1} + \frac{\partial T_{22}^k}{\partial s_2} + k_2 T_{23}^k &= \rho_k h_k \frac{\partial^2 u_2^k}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial T_{13}^k}{\partial s_1} + \frac{\partial T_{23}^k}{\partial s_2} - k_2 T_{22}^k - C^k u_3^k + P_3^k(s_1, s_2, t) &= \rho_k h_k \frac{\partial^2 u_3^k}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial M_{11}^k}{\partial s_1} + \frac{\partial H^k}{\partial s_2} - T_{13}^k &= \rho_k \frac{h_k^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_1^k}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial H^k}{\partial s_1} + \frac{\partial M_{22}^k}{\partial s_2} - T_{23}^k &= \rho_k \frac{h_k^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_2^k}{\partial t^2}; \quad k = 1, 2; \end{aligned} \quad (2)$$

– для і-го поздовжнього ребра

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{11i}}{\partial s_1} + [S]_i &= \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{1i}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial T_{12i}}{\partial s_1} + [T_{22}]_i &= \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{2i}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial T_{13i}}{\partial s_1} + [T_{23}]_i &= \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{3i}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial M_{11i}}{\partial s_1} - T_{13i} + [H]_i &= \rho_i I_{1i} \frac{\partial^2 \varphi_{1i}}{\partial t^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M_{12i}}{\partial s_1} + [M_{22}]_i = \rho_i I_{cri} \frac{\partial^2 \varphi_{2i}}{\partial t^2}; \quad i = \overline{1, I};$$

– для j-го поперечного ребра

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{21j}}{\partial s_2} + [T_{11}]_j &= \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{1j}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial T_{22j}}{\partial s_2} + k_{2j} T_{23j} + [S]_j &= \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{2j}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial T_{23j}}{\partial s_2} - k_{2j} T_{22j} + [T_{13}]_j &= \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{3j}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial M_{21j}}{\partial s_2} + [M_{11}]_j &= \rho_j I_{crj} \frac{\partial^2 \varphi_{1j}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial M_{22j}}{\partial s_2} - T_{23j} + [H]_j &= \rho_j I_{2j} \frac{\partial^2 \varphi_{2j}}{\partial t^2}; \quad j = \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (4)$$

де C^k – коефіцієнт постелі, який характеризує роботу пружної основи на розтяг-стиск. Числовий алгоритм розв'язання даної задачі базується на використанні інтегро-інтерполяційного методу побудови різницевих співвідношень за просторовими координатами і явної різницевої схеми за часовою координатою.

Як числовий приклад, розглядалася задача динамічної поведінки тришарової циліндричної оболонки еліптичного перерізу з дискретним поздовжньо-поперечним ребристим наповнювачем на пружній основі за дії імпульсного навантаження. Отримані результати дозволяють детально проводити аналіз динамічних процесів у вихідній конструкції на досліджуваному часовому інтервалі.

1. Головки К.Г., Луговой П.З., Мейш В.Ф. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / под ред. акад. НАН Украины А.Н. Гузя. – К.: Изд. – полиграф. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.

2. Павлюк А.В. Динаміка тришарової циліндричної оболонки еліптичного перерізу з поздовжньо-поперечним ребристим дискретним наповнювачем // Фізика і хімія твердого тіла. – 2017. – Т.18, № 2. – С. 243 – 248.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМУВАННЯ ДОВГОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ СУПЕРКОЛОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Ю.Ю.Абросов, В.А.Максимюк

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ

Вступ. Циліндричні оболонки неколового поперечного перерізу широко застосовуються. Наприклад, в будівництві еліптичні порожнисті профілі поєднують в собі переваги круглих і прямокутних профілів [1]. Перспективними є оболонки так званого супереліптичного перерізу [2], який виглядає прямокутником з заокругленими кряями.

Розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) таких оболонок чисельними сітковими методами ускладнюється через так зване явище мембранного замикання (locking) [3]. Явище проявляється у сповільненій, але стійкій, збіжності класичних чисельних методів внаслідок значних згинів за невеликих розтягів. Щодо оболонок колового перерізу, то в розрахунках за внутрішнього тиску мембранне замикання зазвичай не спостерігається. Проте якщо переріз матиме форму суперкола (supercircle), то мембранне замикання може проявитися.

Матеріали і методи. Розглядається тонка довга замкнута циліндрична оболонка, поперечним перерізом якої є суперколо:

$$|x|^n + |y|^n = R^n, \quad n > 2. \quad (1)$$

Зі збільшенням n в (1) суперколо буде наближатись до квадрата з заокругленими кряями, де очікуються великі згини і може виникнути мембранне замикання.

Серединну поверхню оболонки віднесемо [3] до криволінійної системи координат (s, z, γ) , в якій координата s є довжиною дуги суперкола, що відраховується від точки $(x=0, y=R)$ за годинниковою стрілкою.

Нехай під дією сталого і рівномірного внутрішнього тиску p в ізотропній однорідній пружній тонкій оболонці постійної товщини h виникають малі переміщення в поперечному перерізі, а вздовж вісі z переміщення відсутні. Тоді компоненти НДС залежатимуть тільки від координати s .

Чисельний метод побудовано на основі варіаційних принципів з використанням змішаного функціонала, який є сумою енергії деформації оболонки та додаткової умови для реалізації геометричної частини гіпотез Кірхгофа-Лява методом множників Лагранжа. Для знаходження стаціонарних значень функціонала використано варіаційно-різницеви метод [3].

Результати. Розраховано НДС оболонки з такими геометричними та механічними параметрами: $h=0,01$ м; $R=1$ м; $n=4$; $E=210$ ГПа; $\nu=0,3$; $p=10$ кПа. Внаслідок симетрії задачі відносно площин $x=0$ та $y=x$ розглядалась восьма частина області суперкола, тобто $s \in [0, s_k]$, де $s_k=0,8772$ м становить $1/8$ периметра суперкола, який обчислено алгоритмом [4] чисельної дискретизації кривої. Тим же алгоритмом ця дуга розбивалась на K вузлових точок з рівномірним кроком. Практичну збіжність з

точністю до трьох значущих цифр у максимальних значеннях компонент НДС досягнуто при $K=5121$.

В табл.1 для характерних точок суперкола $\tilde{s} = s/s_k$ наведено угини ($\tilde{w} = w/h$), віднесені до тиску p безрозмірні напруження на зовнішній (σ_s^+), внутрішній (σ_s^-) та в серединній (σ_s^0) поверхнях оболонки.

Таблиця 1. Переміщення та напруження в характерних точках суперкола

$\tilde{s}$	$\tilde{w}$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	0,689	5792	100	-5592
0,5	0,289	592	102	-387
1	-0,173	-6614	118	6852

В крайніх наведених характерних точках моменти є великими і мають протилежні знаки. В «діаметральній» точці суперкола ($\tilde{s} = 0$) оболонка згинається подібно пластинці. Тут безрозмірне мембранне напруження в серединній поверхні $\sigma_s^0(0) = 100$ і збігається з точним значенням $R/h=100$. В «діагональній» точці ($\tilde{s} = 1$) оболонка розгинається, а мембранне напруження $\sigma_s^0(s_k) = 118$ стає дещо більшим, оскільки «діагональ» суперкола більша від «діаметра». В середній точці ($\tilde{s} = 0,5$) момент найменший і на порядок менший від максимального.

Відзначимо, що в наведеній праці [2] вивчаються динамічні явища в супереліптичній оболонці, про можливе явище замикання не згадується, а розрахунок НДС в статичі відсутній. Очевидно, на досліджуваних інтервалах часу явище не «встигає» проявитися.

Висновки. Внутрішній тиск в циліндричній оболонці суперколового перерізу викликає значні і різного знаку моменти та згини за невеликих розтягів, що може стати причиною обчислювального явища мембранного замикання. Дана задача може доповнити ряд так званих патологічних тестів.

Література

1. Chan T.M., Gardner L., Law K.H. Structural design of elliptical hollow sections: a review // Proc. Inst. Civil. Engrs.: Struct. Build. – 2010. – **163**, N 6. – P. 391–402.
2. Akgün G., Kurtaran H. Geometrically nonlinear transient analysis of laminated composite super-elliptic shell structures with generalized differential quadrature method // Int. J. Non-Linear Mech. – 2018. – **105**. – P. 221–241.
3. Abrosov Yu. Yu., Maksimuk V.A., Chernyshenko I.S. Influence of Cross-Sectional Ellipticity on the Deformation of a Long Cylindrical Shell // Int. Appl. Mech. – 2016. – **52**, N 4. – P. 529–534.
4. Chernyshenko I.S., Maksimuk V.A. On the stress-strain state of toroidal shells of elliptical cross section formed from nonlinear elastic orthotropic materials // Int. Appl. Mech. – 2000. – **36**, N 1. – P. 90–97.

ОБЕРНЕНІ КОНТАКТНІ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПРУЖНОЇ ПІВПЛОЩИНИ

В.І.Кузьменко, А.О.Молчанов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Безпосереднє вимірювання нормальних і дотичних контактних напружень пов'язане із значними експериментальними труднощами, тому розглядається альтернативний підхід, що полягає у вимірюванні напружень поза контактною поверхнею з подальшим теоретичним розрахунком контактних напружень. Задача відновлення контактних напружень за результатами вимірювань поза площадкою контакту є прикладом оберненої контактної задачі. У більш загальному вигляді проблема формулюється так: визначити поверхневе навантаження, при якому напруження, що з'являються всередині тіла, мають задані властивості. Ці властивості задаються у вигляді певних обмежень: рівнянь та нерівностей і у загальному випадку така обернена задача не має розв'язків. Тому задачу розв'язують в послабленому формулюванні: визначити поверхневе навантаження $q^*(x)$, $x \in \Gamma_q$ при якому напруження, що з'являються всередині тіла, мають найменші відхилення від заданих властивостей

$$J(q^*) = \inf_{q \in W} J(q), \quad (1)$$

де W – множина допустимих значень q , J – функціонал, що виражає відхилення напружень від заданих значень. Задача (1) у більшості випадків є некоректною за Адамаром, оскільки малим змінам напруженості всередині області відповідають скінченні зміни поверхневого навантаження.

Для дослідження некоректної задачі (1) застосовується метод регуляризації Тихонова, у відповідності з яким замість (1) розглядається задача

$$\inf_{q \in W} [J(q) + \alpha \omega(q)] \quad (2)$$

Функціонал $\omega(q)$ називається стабілізатором й повинен забезпечити коректність задачі (2). Числовий параметр $\alpha > 0$ називається параметром регуляризації й вибирається для конкретних задач на основі обчислювального експерименту.

Розглянемо задачу, визначення на відрізку $[-c, c]$ нормального навантаження $q(x_1)$ із заданим головним вектором $2Q_0$ таким чином, щоб в області $\{-c \leq x_1 \leq c, 0 \leq x_2 \leq 2c\}$ виник стан всебічного стиску. У відповідності із цим маємо умову:

$$\int_{-c}^0 q(\xi) d\xi = 2Q_0 \quad (3)$$

Також зусилля $q(x_1)$ повинні бути стискаючими (могли бути реалізовані накладенням штампю):

$$q(x_1) \geq 0, \quad \forall x_1 \in [-c, c]. \quad (4)$$

Поставлена задача при $\nu \neq 0.5$ не має розв'язку, бо при такому значенні коефіцієнта Пуассона у випадку плоскої деформації стан всебічного стиску не може

досягатися ні в одній точці. Тому практичного сенсу набуває задача визначення навантаження, при якому напружений стан був найбільш близьким до стану всебічного стиску. У якості критерію наближення до стану всебічного стиску використаємо інтенсивність напружень:

$$\sigma_u = 2^{-\frac{1}{2}}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6\sigma_{12}^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

так як $\sigma_u = 0$ в стані всебічного стиску. Якщо $q(x_1)$ – розподіл нормальних зусиль на відрізку $[c, d]$ границі півплощини, то компоненти тензора напружень в точці (x_1, x_2) визначається співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_c^d \frac{x_2^3}{[x_2^2 + (x_1 - \xi)^2]^2} q(\xi) d\xi \\ \sigma_{22}(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_c^d \frac{x_2(x_1 - \xi)^2}{[x_2^2 + (x_1 - \xi)^2]^2} q(\xi) d\xi \\ \sigma_{12}(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_c^d \frac{x_2^2(x_1 - \xi)}{[x_2^2 + (x_1 - \xi)^2]^2} q(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (6)$$

Тут σ_{11}, σ_{22} – напруження вздовж осей x_1 та x_2 , σ_{12} – зсувне напруження (напруження в напрямі x_1 , зумовлене зсувом в напрямі x_2).

У відповідності із зазначеним загальним підходом отримуємо наступну варіаційну задачу: визначити функцію $q(x_1)$ на відрізку $[-c, c]$ таким чином, щоб функціонал

$$\int_0^{2c} \int_{-c}^c \sigma_u^2 dx_1 dx_2 + \alpha \int_{-c}^c \{q^2(\xi) + [q'(\xi)]^2\} d\xi \quad (7)$$

набував найменшого значення з виконанням умов (3) й (4).

Для дискретизації задачі відрізок $[-c, c]$ розбивається на $2N$ проміжків рівної довжини, $2M \times 2M$

область $\{-c \leq x_1 \leq c, 0 \leq x_2 \leq 2c\}$ розбивається сіткою квадратних комірок. Умова (3) виключається за допомогою методу штрафних функцій з використанням штрафних доданок виду

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(\sum_{r=1}^{2N} q(x_{1r}) \Delta x_1 - 2Q_0 \right)^2 \quad (8)$$

Обмеження (4) у вигляді нерівностей задовольняються при застосуванні метода локальних варіацій. Отриманий розподіл зусиль $q(x_1)$ без застосування стабілізатора та отриманий розв'язок регуляризованої задачі показують, що регуляризація позбавляє розв'язок від осциляцій, характерних для нестійких задач.

АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОТРІЩИНИ ВЗДОВЖ ЖОРСТКО ЗАКРІПЛЕНОГО КРАЮ ТОНКОЇ НАКЛАДКИ

О.М. Клєцков¹, В.В. Лобода²

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет
²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянемо плоску задачу для мікротріщини $|x| \leq b$, яка розташована вздовж жорстко закріпленого краю $y=0$ ізотропного, лінійно пружного, нескінченного шару (тонкої накладки) товщини h . Тріщина вважається відкритою з рівномірним внутрішнім тиском P_0 на її поверхню.

Застосовуючи до рівнянь Ляме інтегральні перетворення Фур'є отримуємо наступну систему сингулярних інтегральних рівнянь другого роду з ядрами типу Коші

$$\frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_1(t)}{t-x} dt + \gamma f_2(x) + \int_{-b}^b [M_{11}(x,t) f_1(t) + M_{12}(x,t) f_2(t)] dt = 0 \quad (1)$$

$$-\gamma f_1(x) + \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_2(t)}{t-x} dt + \int_{-b}^b [M_{21}(x,t) f_1(t) + M_{22}(x,t) f_2(t)] dt = + \frac{P_0}{\mu \beta} \quad (2)$$

з додатковими умовами

$$\int_{-b}^b f_1(t) dt = 0, \quad \int_{-b}^b f_2(t) dt = 0, \quad (3)$$

де $f_1(x) = \frac{\partial u(x,0)}{\partial x}$, $f_2(x) = \frac{\partial v(x,0)}{\partial x}$ на $-b \leq x \leq b$ - невідомі функції,
 $\beta = \frac{1+\kappa}{\kappa}$, $\gamma = \frac{\kappa-1}{\kappa+1}$, κ - константа Мусхелішвілі.

Розв'язок системи (1)-(3) знайдено за допомогою квадратурної формули Гауса-Чебишева з використанням процедури колокації по вузлам многочлена Чебишева другого роду. Чисельна ілюстрація одержаного розв'язку проведена для мікротріщини довжиною 2 мкм при товщинах накладки в діапазоні 0,6 мкм до 10 мкм. Крім того вважалось, що $\nu = 0,3$, $E = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ н / мкм}^2$, $P_0 = 10^{-10} \text{ н/мкм}^2$. Слід зазначити, що для товщини накладки більшої 5 мкм результати розкриття тріщини фактично не відрізняються від відповідних результатів для півплощини, а для товщини меншої 0,6 мкм розкриття тріщини стають близькими до можливої границі використання лінійної теорії пружності. На основі одержаних результатів проведений аналіз необхідності врахування взаємодії берегів тріщини із-за поверхневого ефекту [1].

Для випадку тонкої накладки скінченної довжини, що контактує з пружною основою скінченних розмірів аналіз проведено за допомогою методу скінчених елементів. Отримані розподіли напружень, розкриття тріщини та швидкості звільнення енергії для різних механічних характеристик складових біматеріалу, їх різних геометричних характеристик і різних навантажень. Для випадку, коли жорсткість основи набагато більша жорсткості накладки, а її довжина набагато більша довжини

тріщини проведено порівняння аналітичних і чисельних результатів і отримане їх хороше узгодження. Аналітичним та чисельним методами проаналізовано також зміна форми розкриття тріщини зі зміною довжини накладки та її товщини, а також варіації швидкості звільнення енергії в залежності від зміни товщини накладки. Виявлено суттєвий ріст останнього фактору при зменшенні її товщини.

1. Jianlin Liu, Runni Wu, and Re Xia. Surface effects at the nanoscale based on Gurtin's theory: a review. J Mech Behav Mater 2014; 23(5-6): 141–151

IDENTIFICATION OF MOMENTS OF INERTIA OF A RIGID BODY

N.V. Zhogoleva, V.F. Shcherbak

Institute of Applied Mathematics and Mechanics NAS of Ukraine, Slavyansk, Ukraine

The problem of inertial characteristics identification. The problem of experimentally determining the inertia tensor of a body of arbitrary shape is a technically complex task. At the same time, these quantities are included in the laws of motion of mechanical objects and in many situations may change during the movement. All this makes relevant methods for determining inertial parameters based on the results of measuring output signals in real time.

This report examines the model problem of determining the main moments of inertia of a rigid body with a fixed point from information about its angular velocity. The solution is carried out using the synthesis of invariant relations in extended phase space. The method of invariant relations was developed in analytical mechanics [1] and consists of obtaining additional equations connecting the components of a mathematical model. Its modification in control theory makes it possible to form finite relations for determining unknowns in inverse control problems [2].

We will consider a model of a free rigid body rotating around its center of mass. It is required to determine the main central moments of inertia I_1, I_2, I_3 based on the results of measuring the angular velocity vector $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$. Let us introduce dimensionless parameters

$$a_1 = \frac{I_2 - I_3}{I_1}, \quad a_2 = \frac{I_3 - I_1}{I_2}, \quad a_3 = \frac{I_1 - I_2}{I_3}.$$

Then Euler's equations, written in the main axes, take the form

$$\dot{\omega}_1 = a_1 \omega_2 \omega_3, \quad \dot{\omega}_2 = a_2 \omega_3 \omega_1, \quad \dot{\omega}_3 = a_3 \omega_1 \omega_2. \quad (1)$$

Problem. Find asymptotically accurate estimates of the parameter vector $a = (a_1, a_2, a_3)$ of system (1) based on the results of measuring the angular velocity vector

Let us supplement system (1) with an auxiliary system of differential equations

$$\dot{A}_i = u_i(A_1, A_2, A_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

The analytical form of the right-hand sides (2) will be chosen for the purposes of solving the identification problem, then the values of the functions $A_1(t), A_2(t), A_3(t)$ will be found as a result of solving the corresponding Cauchy problem.

Synthesis of invariant relations. Let us express the deviations $A_1(t), A_2(t), A_3(t)$ from the values of the unknowns a_1, a_2, a_3 in the form of some functions

$$a_i - A_i = \Phi_i(\omega_1, \omega_2, \omega_3), \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

The last equalities cannot be satisfied in the entire variable space a, ω . Let's introduce variables for the residual $\delta_i, i=1,2,3$ and as a result we obtain equalities connecting a_1, a_2, a_3 , functions not yet defined $A_i(t)$, and δ_i

$$a_i - A_i = \Phi_i(\omega_1, \omega_2, \omega_3) + \delta_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Differentiating (4), we obtain differential equations for deviations δ_i

$$\dot{\delta}_i = u_i - \Phi'_{i\omega_1}(A_1 - \Phi_1 - \delta_1)\omega_2\omega_3 - \Phi'_{i\omega_2}(A_2 - \Phi_2 - \delta_2)\omega_1\omega_3 - \Phi'_{i\omega_3}(A_3 - \Phi_3 - \delta_3)\omega_1\omega_2,$$

Let us choose controls u_i in such a way that the differential equations for deviations become homogeneous and thus allow a trivial solution $\delta_i(t) \equiv 0, i=1,2,3$. Let the right sides of (2) be equal

$$u_i = \Phi'_{i\omega_1}(A_1 - \Phi_1)\omega_2\omega_3 + \Phi'_{i\omega_2}(A_2 - \Phi_2)\omega_1\omega_3 + \Phi'_{i\omega_3}(A_3 - \Phi_3)\omega_1\omega_2. \quad (5)$$

Then the equations for residuals δ_i take the form

$$\dot{\delta}_i = \Phi'_{i\omega_1}\omega_2\omega_3\delta_1 + \Phi'_{i\omega_2}\omega_1\omega_3\delta_2 + \Phi'_{i\omega_3}\omega_1\omega_2\delta_3, \quad i=1,2,3. \quad (6)$$

Asymptotic estimation. When choosing certain functions $\Phi_i, i=1,2,3$ and initial conditions $A_1(0), A_2(0), A_3(0)$ in the Cauchy problem for system (2), the two terms on the right-hand sides of relations (4) will be completely defined. This means that in formulas (4), in addition to the unknown unknowns a_1, a_2, a_3 , only the terms $\delta_i(t), i=1,2,3$ will remain uncertain.

In order for relations (4) to be used to estimate the parameters a_1, a_2, a_3 it is necessary that the trivial solution of the system of differential equations (6) have the property of global asymptotic stability. To do this, we choose free functions $\Phi_i, i=1,2,3$ in the form

$$\Phi_i(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = -\frac{1}{2}s(a_{i1}\omega_1^2 + a_{i2}\omega_2^2 + a_{i3}\omega_3^2), \quad i=1,2,3, \quad (7)$$

where $s = \text{sign}(\omega_1\omega_2\omega_3)$, constant values a_{ij} are components of a certain matrix $A = (a_{ij}), i, j = 1, 2, 3$, in which all roots $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ its characteristic equation $\Delta(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0$ have negative real parts. For such functions, the system of differential equations (6) takes the form

$$\dot{\delta}_i = |\omega_1\omega_2\omega_3|(a_{i1}\delta_1 + a_{i2}\delta_2 + a_{i3}\delta_3), \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

В итоге получаем, что невязка $\delta_i(t), i=1,2,3$ в соотношениях (4) с ростом t асимптотически стремится к нулю.

Non-linear identifier. The result is a parameter identifier design consisting of an auxiliary system of differential equations and formulas for the connection between known and unknown quantities. Let's write down its final form. As a matrix A , we take a diagonal matrix: $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, where $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ are negative real numbers. Then, the auxiliary system of differential equations (6) takes the form

$$\dot{A}_i = -s\lambda_i\omega_i(A_i + \frac{1}{2}s\lambda_i\omega_i^2)\omega_2\omega_3, \quad (1, 2, 3) \quad (9)$$

By arbitrarily choosing the initial conditions $A_1(0), A_2(0), A_3(0)$ and solving the corresponding Cauchy problem for system (9), we substitute the resulting solution into the formulas

$$\hat{a}_i(t) = A_i(t) - \frac{1}{2}s\lambda_i\omega_i^2(t), \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

The estimates $\hat{a}_i(t)$ differ from the desired parameters a_i by the amount of residual $\delta_i(t)$, which, as shown earlier, asymptotically tends to zero as t increases. Thus, formulas (10) form the asymptotic estimates a_1, a_2, a_3 .

Acknowledgments. This work was partially supported by a grant from the Simons Foundation (Award 1160640, Presidential Discretionary-Ukraine Support Grants, N.V. Zhogoleva, V.F. Shcherbak).

1. П.В. Харламов *Об инвариантных соотношениях системы дифференциальных уравнений* // Механика твердого тела. – 1974. – Вып. 6. – С. 15-24.
2. Н.В. Жоголева В.Ф.Щербак *Синтез дополнительных соотношений в обратных задачах управления* // Труды ИПММ НАН Украины. – 2015. – Т. 29. – С. 69-76.

ПРО ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СФЕРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З ЕЛІПТИЧНИМ ОТВОРОМ

В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

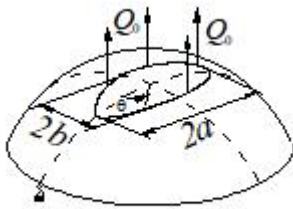


Рис. 1

Розглянемо задачу про концентрацію напружень біля центрального еліптичного отвору в тонкій сферичній оболонці (рис. 1) під дією внутрішнього тиску p та перерізуючої сили Q_k на контурі отвору. Контур еліптичного отвору, строго кажучи неплоский, утворено перетином сферичного сегмента радіусом R з еліптичним циліндром з півосями a і b . За спряжену візьмемо півгеодезичну (ρ, θ) систему координат з початком у центрі отвору. Неспряжену косокутну систему координат (ξ_1, ξ_2) , у якій координатні лінії $\xi_1 = \text{const}$ збігаються з внутрішнім (еліпсом) і зовнішнім (колом) контурами серединної поверхні оболонки, а лінії $\xi_2 = \text{const}$ є меридіанами сфери, уведемо перетвореннями

$$\rho = s_1 + \xi_1(s_2 - s_1); \quad \theta = \xi_2,$$

де $s_1 = R \arcsin r_1/R$, $r_1 = ab/\sqrt{a^2 \sin^2 \xi_2 + b^2 \cos^2 \xi_2}$, $s_2 = s_k = \text{const}$.

Змінна перерізуючої сила обчислювалася за формулою [1]:

$$Q_k = \frac{pr_0}{2} \left(1 - \frac{5}{4} \varepsilon^2 - 2\varepsilon(1-\varepsilon) \cos 2\gamma \right),$$

де $r_0 = (a+b)/2$; $\varepsilon = (a-b)/(a+b)$; $b \tan \gamma = a \tan \theta$.

Аналіз результатів розрахунків [1, 2] дозволяє відзначити ряд особливостей зміни напруженого стану, що викликані збільшенням еліптичності отвору. Так для тонкої оболонки ($R/h = 400$; $r_0/h = 30$; $s_k/h = 180$; $E = 67$ ГПа; $\nu = 0,3$) встановлено:

- 1) біля вузької ($\theta = 0^\circ$) частини отвору максимальні напруження переміщуються з зовнішньої на внутрішню поверхню оболонки;
- 2) біля широкої ($\theta = 90^\circ$) частини отвору максимальні напруження мають місце на зовнішній поверхні оболонки і зростають;
- 3) на внутрішній поверхні біля широкої частини ($a/b = 1,5; 2,0$) отвору має місце стиск;
- 4) найбільші у всій оболонці напруження переміщуються від широкої ($a/b = 1,01; \theta = 90^\circ$) частини до вузької ($a/b = 2,0; \theta = 0^\circ$).

Остання особливість має місце навіть за дуже малої еліптичності і виглядає дещо незвично з позицій закономірностей НДС у пластинці й обумовлена, очевидно, саме наявністю змінної перерізуючої сили. Загалом, зі збільшенням еліптичності процес деформування біля отвору змінюється від усебічного розтягу й згину, характерного для оболонки з круговим отвором, до переважно розтягу біля вузької частини отвору і вигину біля широкої.

Література

1. Maksimyyuk V.A., Mulyar V.P. Nonaxisymmetric deformation of open spherical shells with a curvilinear hole // Int. Appl. Mech. – 2008. – 44, N 5. – P. 555–561.
2. Maksimyyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Variational finite-difference methods in linear and nonlinear problems of the deformation of metallic and composite shells (review) // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 6. – P. 613 – 687.

ДИСКРЕТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІПОТЕЗ КІРХГОФА–ЛІВА В РОЗРАХУНКАХ НЕПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛІПТИЧНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ

О.В. Піголь, В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Розглядається тонка циліндрична оболонка з еліптичним поперечним перерізом і сталою товщиною h , яка ослаблена круговим отвором радіусу r_0 і віднесена до криволінійної ортогональної системи координат (x, φ, γ) , де x, γ – довжини твірної та нормалі до серединної поверхні оболонки, φ – кут між нормаллю до серединної поверхні та вертикальною віссю (рис. 1). Вважаємо, що оболонка виготовлена з ізотропного однорідного матеріалу та знаходиться під дією поверхневих і крайових сил.

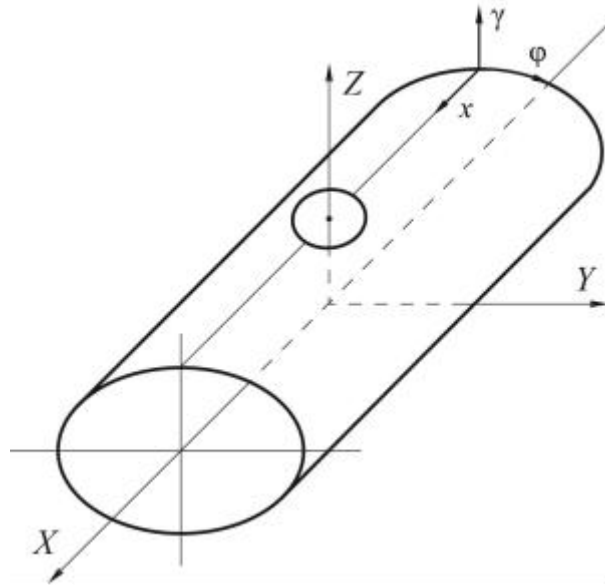


Рис. 1 – Еліптична циліндрична оболонка з круговим отвором

Геометрію серединної поверхні оболонки задамо в глобальній декартовій системі координат (X, Y, Z) , вісь якої паралельна твірній, а вісь OZ проходить через центр отвору.

Геометричні співвідношення подамо у векторній формі згідно з теорією непологих оболонок, в якій мають місце гіпотези Кірхгофа–Лява [1]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial x}; & \varepsilon_{22} &= \vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_2 \partial \varphi}; & \varepsilon_{12} &= \vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial x} + \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_2 \partial \varphi}; \\ \mu_{11} &= \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{g}}{A_1 \partial x}; & \mu_{22} &= \vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{g}}{A_2 \partial \varphi}; & 2\mu_{12} &= \vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{g}}{A_1 \partial x} + \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{g}}{A_2 \partial \varphi}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\vec{u} = u\vec{e}_1 + v\vec{e}_2 + w\vec{n} = u_1\vec{i}_1 + u_2\vec{i}_2 + u_3\vec{i}_3$ – вектор переміщень точок серединної поверхні оболонки; $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{n}$ – орти системи координат (x, φ, γ) ; $\vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3$ – орти глобальної декартової системи координат (X, Y, Z) ; $\vec{g} = g_x\vec{e}_1 + g_\varphi\vec{e}_2 = g_1\vec{i}_1 + g_2\vec{i}_2 + g_3\vec{i}_3$ – вектор кутів повороту нормалі, які визначаються згідно з гіпотезами Кірхгофа–Лява за формулами:

$$g_x = -\vec{n} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial x}; \quad g_\varphi = -\vec{n} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_2 \partial \varphi}. \quad (2)$$

Приймаючи, що навантаження оболонки просте, скористаємося фізичними співвідношеннями теорії малих пружно-пластичних деформацій [1].

Систему розв'язувальних рівнянь отримаємо з принципу можливих переміщень з використанням методу додаткових напружень і методу скінченних елементів (МСЕ). На кожній ітерації методу додаткових напружень лінійну задачу розв'язуємо за допомогою варіанта МСЕ, розробленого з урахуванням особливостей деформування тонких оболонок неканонічної форми, ослаблених криволінійними отворами. Запропонована модифікація МСЕ має ряд особливостей.

1. Для компонентів деформації оболонки використовуються співвідношення у векторній формі (1).
2. При побудові скінченного елемента (СЕ) оболонки апроксимується вектор переміщень $\vec{u}$, тобто проєкції цього вектора на осі глобальної декартової системи

координат (X, Y, Z) :

$$u_k = \sum_{i=1}^4 u_k^{(i)} L_i(\xi_1, \xi_2) \quad (k=1, 2, 3), \quad (3)$$

а не його компоненти (u, v, w) в системі координат (x, φ, γ) .

У співвідношеннях (3) позначено: i – локальний номер вузла СЕ; $L_i(\xi_1, \xi_2)$ – білінійні функції форми локальних координат ξ_1, ξ_2 .

3. В класичному МСЕ для тонких оболонок кути повороту нормалі визначаються за формулами (2), що вимагає неперервності похідних першого порядку від апроксимуючих функцій для вектора переміщень. У випадку еліптичної циліндричної оболонки з криволінійним отвором зазначені вище умови неперервності задовольнити дуже складно. Тому в даній роботі вектор кутів повороту нормалі $\vec{\vartheta}$ не обчислюється за формулами (2), а апроксимується біквадратичними поліномами серендипового типу $K_i(\xi_1, \xi_2)$ з виконанням гіпотез Кірхгофа – Лява тільки у вузлах СЕ [2]:

$$\vartheta_k = \sum_{i=1}^8 \vartheta_k^{(i)} K_i(\xi_1, \xi_2) \quad (k=1, 2, 3). \quad (4)$$

Таким чином, у співвідношеннях розробленого варіанту МСЕ відсутні похідні від апроксимуючих функцій вище першого порядку, що значно спрощує процес дискретизації задач.

Ефективність розробленої методики перевірялася шляхом розв’язання тестової задачі для замкнутої довгої циліндричної оболонки овального поперечного перерізу за дії рівномірного внутрішнього тиску і порівняння отриманих результатів з даними точного розв’язку [3].

Список використаних джерел

1. Guz A.N., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Nonlinear Two-Dimensional Static Problems for Thin Shells with Reinforced Curvilinear Holes // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, N 12. – P. 1269–1300.
2. Areias P.M.A., Song J.-H., Belytschko T. A finite-strain quadrilateral shell element based on discrete Kirchhoff-Love constraints // Int. J. Numer. Meth. Eng. – 2005. – 64. – P. 1166–1206.
3. Storozhuk E.A., Yatsura, A.V. Exact Solutions of Boundary-Value Problems for Noncircular Cylindrical Shells // Int. Appl. Mech. – 2016. – 52, N 4. – P. 386–397.

ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТАЕВРИСТИЧНОГО МЕТОДУ ГЕПАРДА ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

А. Ю. Нуштаєва, А.Є. Шевельова

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Фотоелектрична система — електрична система, яка поглинає сонячну енергію за допомогою окремих сонячних елементів, принцип роботи яких ґрунтується на явищі внутрішнього фотоелефекту в напівпровідниках. Сонячні фотоелектричні системи стають все більш популярними завдяки своїм екологічним, економічним та технічним характеристикам. Коли сонячне світло потрапляє на сонячні елементи, фотони світла поглинаються напівпровідниковим матеріалом, вивільняючи електрони та генеруючи електричний струм. Потім цю електроенергію можна використовувати для різних застосувань, від живлення будинків і підприємств до зарядки електромобілів і забезпечення електроенергією віддалених місць.

Для моделювання, керування та контролю системами фотоелектричної енергії, основним завданням є точне та надійне визначення невідомих параметрів, використовуючи надійний алгоритм оптимізації. Досліджуються однодіодна, дводіодна та фотоелектрична модель модулів. Ці моделі повинні включати параметри, які можуть змінюватися зі змінами середовища, несправностями та старінням. Тому розробка алгоритму оптимізації, здатного точно оцінювати властивості фотоелектричних моделей за допомогою вимірювань струму й напруги фотоелектричної комірки та модуля, є актуальною задачею.

Для розв'язання задачі використано метаевристичний алгоритм — модифікований оптимізатор гепарда [1]. Алгоритм спирається на кілька стратегій полювання, які використовують гепарди. Кожна змінна розв'язку вважається можливим розташуванням групи гепардів. Режими пошуку, сидіти-і-чекати, та режим атаки були математично змодельовані як основні стратегії алгоритму оптимізатору гепарда. Побудова розв'язку складається з кількох етапів, які починаються з визначення розміру популяції та обмежень, після цього створюється початкова популяція, яка представлена як зграя гепардів. Після побудови початкового розв'язку система починає працювати шляхом переміщення гепардів. Процес створення розв'язків триватиме, доки не буде знайдено найкращий можливий або не буде досягнуто умови зупинки. Оптимізатор гепардів є динамічним алгоритмом, тому що він уникає локальних розв'язків завдяки можливості змінювати розташування в ієрархії [2].

Було розроблено програмне забезпечення на мові C# для реалізації алгоритмів модифікованого оптимізатору гепарда. Отримані результати представлено у вигляді порівняльних таблиць. Показано ефективність алгоритму для оптимізації роботи та планування енергосистем, включаючи розміщення розподілених генерацій з відновлюваних джерел, економічне розподіл навантаження живлення.

1. Akbari M.A., Zare M., Azizipanah-abarghooee R., Mirjalili S., Deriche M. The cheetah optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems. *Scientific Reports* 12, article number: 10953, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14338-z>
2. Memon Z.A., Akbari M.A., Zare M. An Improved Cheetah Optimizer for Accurate and Reliable Estimation of Unknown Parameters in Photovoltaic Cell and Module Models. *Applied Sciences* 13(18), 2023, 9997. <https://doi.org/10.3390/app13189997>

Доповіді секції: Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті (18-19 квітня 2024)

ЗМІСТ

1(93) М.А. Пишний, Н.А. Гук, О.М. Гулеша МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ	99
2(63) В.І. Руженцев, В. Ю. Клим ІДЕНТИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	101
3(107) А.П. Дзюба, П.А. Дзюба МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ШИРОКОМАСШТАБНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ	103
4(2) П.О.Стеблянко МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛА	106
5(83) Г. І. Нестеренко, С. І.Бібік, М. І. Музикін АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ	107
6(79) O.R. Hachkevich, O.B. Humenchuk, A. Kozyarska, R.F. Terletskyi MODELING AND OPTIMIZATION OF THE THERMOSTRESSED STATE OF SEMITRANSSPARENT SOLIDS WITH CAVITIES SUBJECTED TO THERMAL RADIATION	108
7(69) Yu.M. Kononov MODELING OF ROTATION IN A RESISTIVE MEDIUM OF AN ELASTIC SOLID BODY WITH CAVITIES CONTAINING LIQUID, IN THE FORM OF A SYSTEM OF TWO AND THREE ELASTICALLY COUPLED RIGID BODIES WITH LIQUID	109
8(55) M.O.Babeshko, V.G.Savchenko NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF LOOSENING OF ISOTROPIC MATERIAL IN AXISYMMETRIC SPATIAL AND SHELL ELEMENTS OF STRUCTURES	109
9(66) A.V. Sokhatskyi TURBULENCE MODELS IN NUMERICAL METHODS FOR DETERMINATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF VEHICLES	109
10(74) Yu.M. Kononov, O.V. Nesmelova, Ya.I. Svyatenko ON THE STABILITY OF ROTATION ON THE SUSPENSION OF A LAGRANGE GYROSCOPE WITH AN IDEAL FLUID	110
11(84) Ю.С.Тарасенко, Г.Є.Ященко СИСТЕМИ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТАР ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНОСФЕРИ	110
12(56) N.V. Zhogoleva, V.F. Shcherbak IDENTIFICATION OF MOMENTS OF INERTIA OF A RIGID BODY	113

13(61) Y.P.Glukhov MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN A LAYERED BASE WITH INITIAL STRESSES	113
14(62) A.Y.Glukhov , Y.P.Glukhov PROPAGATION OF ELASTIC TORSIONAL WAVES ALONG LAYERS OF AN INCOMPRESSIBLE COMPOSITE MATERIAL WITH INITIAL STRESSES	114
15(39) В.А. Максимюк, Н.В. Максимюк ПРО ОБЧИСЛЕННЯ ТОЧКИ РОСИ В ТАБЛИЦЯХ EXCEL	114
16(73) О.М Давидчик, А.П Коваленко, В.А. Коваленко ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ДОРОЖНІХ УМОВ	116
17(94) Р.О. Харченко, О.М. Гулєша МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ДО ПРИМІЩЕННЯ НА МІКРОКОНТРОЛЕРІ ARDUINO	117
18(95) О.В. Живодьор, О.М. Гулєша МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВІДОБРАЖЕННЮ ЧАСУ У ПРИМІЩЕННІ	119
19(86) Ю.С.Тарасенко, П.О.Стеблянко, Н.І.Максимчук СТРУКТУРУВАННЯ АСПЕКТІВ ПІЗНАННЯ	120
20(96) М.С. Савельєв, О.М. Гулєша МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗЧИТУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ TXT ФАЙЛІВ НА БАЗІ ARDUINO NANO	123
21(108) І. А. Сафронова, А. П. Дзюба АЛГОРИТМ ПРИСКОРЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТАПОЛЯЦІЙНИХ ПОЛІНОМІВ	124



МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

М.А. Пишний¹, Н.А. Гук¹, О.М. Гулєша²

¹Національний університет імені Олеся Гончара

²Дніпровський державний технічний університет

У недавньому минулому, для обробки відповідей на тест студентами виділялася велика кількість часу. Сьогодні в навчальному процесі широко використовуються різні електронні системи навчання і тестування, спектр і кількість яких збільшується з року в рік. Йде автоматизація всієї ручної праці і тести не обходять стороною. Важливим є питання надійності зберігання, конфіденційності відомостей і часу що витрачається на обробку даних, а також важлива гнучкість системи в термінах її відповідності характеристикам і потребам окремих учнів. Для досягнення згаданої гнучкості, як правило, використовується «модель учня», тобто модель інтелектуальної системи контролю знань, яка зберігає інформацію про хід навчального процесу, стан знань і навичок учня. Для вирішення таких завдань розробляється і використовується спеціальне програмне забезпечення.

Модель інтелектуальної системи контролю знань умовно можна розділити на дві частини: керуючу систему і об'єкти управління. Керуюча система містить методи вибору з бази даних питання по заданій темі T із заданим рівнем складності K , а також метод розрахунку оцінки за виконання тесту O_{st} з урахуванням похибки тестування ξ (наприклад, ймовірності вгадування правильної відповіді на завдання). До об'єктів управління слід віднести наступні компоненти:

1) компонента «База даних» включає набори питань і завдань, їх рівні складності і тематичну приналежність, призначених для перевірки знань студента та/або дані для формування завдань. Контрольні завдання можуть також генеруватися автоматично;

2) компонента «База знань» містить методи і/або моделі процесу адаптивного контролю, а також сукупність знань предметної області;

3) компонента «Адаптивний контроль знань» виконує наступні функції: аналіз проходження тесту студентом (перевірка правильності його відповідей і виконуваних дій); управління процесом контролю знань на основі обраного методу; визначення результатів контролю, яке зазвичай зводиться до виставлення оцінки студенту.

4) «модель учня» – це компонента, що відповідає за отримання відповідей студента на поставлені питання.

Контроль знань здійснюється наступним чином. У систему управління подаються відомості про первинні параметри вектора $\vec{v}$ питання однозначно заданого у вигляді $\langle V, K, T \rangle$.

«Модель учня» видає результат за виконання запропонованого завдання V із заданим рівнем складності K по темі T . Відомості про правильність виконання завдання R_{zad} розміщуються в компоненту «Адаптивний контроль знань», яка, у свою чергу, на основі аналізу відповіді студента R_{zad} і використовуваного алгоритму проведення контролю, враховуючи зовнішні ресурси системи R_1 (наприклад, систему оцінювання знань студента) і внутрішні ресурси студента R_2 (наприклад, час контролю), визначає оцінку за виконання поточного завдання O_{zad} . «БЗ», отримавши від компоненти «Адаптивний контроль знань» дані про оцінку поточного завдання, повертає на вхід

системи вектор $\vec{b}$ відповідний параметрам наступного питання. Певний параметр K передається на вхід системи. O_{st} виставляється компонентою «БЗ», враховуючи цілі контролю знань Z (наприклад, вхідний контроль, підсумковий контроль) і закладені в БЗ методи для завершення тесту. Після отримання керуючою системою загальної оцінки за виконання тесту і похибки тестування ξ обчислюється скоригована оцінка за тест O_{st} .

Організація підсистеми оцінювання знань є однією з найбільш складних задач при синтезі інтелектуальної системи тестування знань учнів в реальному масштабі часу. При оцінюванні знань необхідно врахувати індивідуальні здібності учнів, правильність виконання кожного із завдань, враховуючи кількість припустимих кожним учнем помилок, а також ймовірність вгадування правильної відповіді учнем. З урахуванням введених параметрів, які впливають на результат проходження тесту, динаміка зміни результату виконання тесту при виконанні кожного із завдань може бути описана за допомогою формули:

$$f(N, r_i, z_i, c_i, B) = 1,$$

де N – кількість тестових завдань, які виконуються учнем; r_i – коефіцієнт оцінювання завдань різних форм. Безперервна величина, змінюється в діапазоні $[0, 1]$; z_i – рівень складності i -го завдання; c_i – ймовірність вгадування правильної відповіді на i -е завдання; B – бальність системи.

При оцінюванні знань застосовуються різні системи оцінювання (5-бальна, 100-бальна, буквена). Для отримання результату в заданій системі оцінювання знань, введемо спеціальний параметр B – бальність системи. Завдання полягає в тому, щоб вказати відповідні формули для введених вище величин коефіцієнта оцінювання знань при виконанні завдань різних форм r_i та ймовірності вгадування правильної відповіді c_i .

Визначення коефіцієнтів оцінювання завдань різних форм. Для того, щоб об'єктивно оцінити знання при тестуванні з використанням тестових завдань різних форм пропонується використовувати для кожної з форм завдань свою методику розрахунку оцінки. Пропонується використання безперервної шкали оцінювання на інтервалі $[0, 1]$. Визначимо коефіцієнт оцінювання знань для відповідей на тестові завдання різних форм окремо.

Одноальтернативні тестові завдання. Для оцінювання одноальтернативного тестового завдання досить застосування відомої дихотомічної шкали оцінювання, в якій 1 відповідає вірній відповіді, 0 – невірній. Отже, в цьому випадку коефіцієнт r_i приймає одне із значень 0 або 1. Використання вибіркового відповідей пов'язане з можливістю неадекватної оцінки знань учня у разі випадкового введення вірної відповіді.

Закрите тестове завдання. Для відповіді на тестові завдання закритого типу розглянемо відповідь на одноальтернативні тестові завдання. Одноальтернативні тестові завдання представляють собою завдання, в яких q варіантів відповіді, один з яких правильний. Ймовірність вгадування правильної відповіді c_i в даному випадку визначається за формулою:

$$C_i = 1/q.$$

ІДЕНТИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

В.І. Руженцев¹, В. Ю. Клим²

¹ *Харківський національний університет радіоелектроніки*

² *Університет митної справи та фінансів*

За останні роки розвиток інформаційно-комунікаційних технологій суттєво розширив коло проблем в питаннях захисту інформації. Для симетричних криптосистем, як найбільш поширених в практичному застосуванні, оскільки вони історично стали першими алгоритмами шифрування і технічно відносно прості у реалізації, розробка нових та вдосконалення відомих методів криптоаналізу наразі має актуальний запит.

Потужність сучасних обчислювальних систем не тільки визначає високий рівень вимог, яким повинна відповідати криптосистема, але й відкриває нові можливості для їх тестування і перевірки на стійкість [1 – 4].

Таким чином, задачі криптоаналізу набули підвищеної складності і комплексності, для вирішення яких потрібен відповідний потужний інструментарій. Таким сучасним інструментом для криптоаналізу стали технології штучних нейронних мереж, яким притаманна велика варіація архітектур, алгоритмів навчання, параметрів налаштування [2, 5 – 6].

В класичних типах криптоаналітичних атак вихідними умовами задачі криптоаналізу є приналежність шифротекстів повідомлень до одного алгоритму шифрування. Тобто в загальній постановці криптоаналітичної задачі вже закладена обмеженість розпізнавання шифру за допомогою спеціалізованих механізмів в рамках тільки одного алгоритму. Огляд напрямків сучасних досліджень показав, що замало уваги приділено комплексним задачам, коли вихідними умовами є приналежність шифротекстів повідомлень до кількох алгоритмів шифрування. Тобто сценарій дій криптоаналітика для такого випадку, коли комплексну задачу можна розділити на окремі задачі (етапи), практично залишено відкритим питанням [6].

Таким чином, розробка методів відокремлення шифротексту повідомлень, які належать одному алгоритму шифрування, з вихідного набору шифротекстів, опрацьованих різними алгоритмами шифрування, становить актуальність теми роботи.

Об'єкт дослідження – криптоаналіз блокових алгоритмів шифрування.

Предмет дослідження – модель ідентифікації блокових алгоритмів шифрування за допомогою нейронних мереж.

Метою роботи є побудова моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж для покращення ефективності їх криптоаналізу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання для вирішення:

- виконати аналіз огляду найбільш поширених алгоритмів блокового шифрування та особливості використання блочних шифрів в режимах електронної шифрувальної книги;

- провести огляд сучасних методів криптоаналізу, які застосовують до блочних алгоритмів шифрування;

- обґрунтувати вибір нейронної мережі для моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування;
- надати теоретичний опис та зміст складових моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування з використанням нейронних мереж;
- скласти коректне формулювання моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж;
- провести тестування побудованої моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж та аналіз отриманих результатів.

В роботі розглянуто основні задачі криптоаналізу в загальному вигляді, надані стислі характеристики найбільш поширених блочних симетричних алгоритмів шифрування (AES, MARS, RC6, Serpent, TwoFish), висвітлені особливості використання блочних шифрів в режимах електронної шифрувальної книги ECB, вказані методи криптоаналізу для симетричних криптосистем, розглянуто принцип роботи та основні параметри нейронної мережі Кохонена, надані основні характеристики матриці подібності і її застосування в задачах класифікації. Теоретичні відомості, які складають основу моделі ідентифікації алгоритмів шифрування, містять необхідні визначення криптосистеми, блочного шифру та режиму шифрування, постановку задачі, головні співвідношення для застосування нейронної мережі Кохонена, формулювання моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж. Виконано попереднє тестування побудованої моделі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж на невеликій вибірці даних та проведений аналіз отриманих результатів.

Таким чином, в роботі сформульована математична постановка задачі ідентифікації алгоритмів блокового шифрування для більш загальної постановки криптоаналітичної задачі; запропонована обчислювальна модель ідентифікації алгоритмів блокового шифрування за допомогою нейронних мереж Кохонена вирішує комплексну задачу криптоаналізу на початковому етапі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості демонстрації застосування моделі ідентифікації алгоритмів шифрування за допомогою нейронних мереж для тестування криптосистем в більш загальній постановці.

Література

1. ДСТУ 7624:2014 «Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм симетричного блокового перетворення». http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=65314 (дата звернення: 23.09.2023).
2. Методичні рекомендації до виконання індивідуального завдання з навчальної дисципліни “Безпека програм та даних” для студентів спеціальностей 122 “Комп’ютерні науки”, 121 “Інженерія програмного забезпечення” денної форми навчання / уклад. Євсєєв С.П., Шматко О.В., Іващенко О.В. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. 72 с.
3. Коркішко Т., Мельник А., Мельник В. Алгоритми та процесори симетричного блокового шифрування. Львів: Бак, 2003. 168 с. ISBN 966-7065-43-X.
4. Горбенко І. Д., Гулак Г. М. та інші. Аналіз властивостей алгоритмів блокового симетричного шифрування (за результатами міжнародного проекту NESIE) *Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* Х.: ХНУРЭ, 2005. № 141. С. 7 – 24.
5. Ruzhentsev V., Levchenko R. Fediushyn O. Cryptanalysis of Simple Substitution-Permutation Cipher Using Artificial Neural Network. *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 631-634, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467945.

6. Souza, W. A. R. de, Carvalho, L. A. V and Xexeo, J. A. M., Identification of N Block Ciphers. *IEEE Latin America Transactions*, 2011. Vol. 9. P. 184-191.

МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ШИРОКОМАСШТАБНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ

А. П. Дзюба, П. А. Дзюба

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Експериментальні дослідження займають важливе місце у вивченні найбільш проблемних аспектів поведінки багатьох елементів конструкцій. Серед таких проблем особливе місце займають дослідження стійкості оболонкових елементів конструкцій з пошкодженнями однорідності різної природи. Складність теоретичного дослідження проблеми обумовлюється тим, що ще задовго до досягнення навантаженням свого критичного значення можливий значний перерозподіл навантажень, викликаний взаємодією двох полів – основного напруженого стану, що поширюється по всій поверхні оболонки, і зони збурення напружень поблизу отвору, що виникає раніше, ніж настає загальна втрата несучої здатності оболонки. А це, в свою чергу, призводить до суттєвої нелінійності задачі у цілому, розв'язок якої пов'язаний зі значними математичними труднощами.

Однією з перших задач, з якою зустрічається експериментатор у своїх дослідженнях, є виготовлення моделей (зразків) для проведення випробувань. Основна проблема при цьому полягає у тому, що моделі повинні бути такими, щоб різниця значень досліджуваного параметра (в даному випадку критичних навантажень) для різних номінально однакових зразків була меншою різниці, пов'язаної зі зміною досліджуваного параметра. Цей аспект експериментального дослідження стійкості висуває, як першочергову, проблему виготовлення номінально однакових високоякісних оболонок.

Слід зазначити, що масове виготовлення таких високоякісних моделей із застосуванням сучасних технологій можливе, але пов'язане з досить високою вартістю навіть для випадку невеликої серії моделей.

Найбільш істотним, практично неконтрольованим фактором, особливо при осьовому стиску виготовлених із листових матеріалів циліндричних оболонок, є початкові геометричні недосконалості форми. Відома досить висока чутливість величини критичної сили втрати стійкості гладкої циліндричної оболонки до таких початкових геометричних недосконалостей форми, умов закріплення, різновитчинності, нерівномірності навантаження та інших факторів, що мають місце вже при виготовленні, і які, як показують результати досліджень, часто й ініціюють втрату стійкості оболонки.

При цьому величина таких недосконалостей для моделі, виготовленої з листового матеріалу, у значній мірі визначається її відносною товщиною δ/R , де δ , R – товщина стінки і радіус кривини оболонки, відповідно. Зменшення параметра δ/R приводить до збільшення впливу початкових геометричних недосконалостей і, як результат, – до різкого падіння критичних напружень та фактичного нівелювання впливу зміни досліджуваного параметра на процес та кількісні параметри втрати стійкості.

Прагнення експериментатора зменшити чи виключити, по можливості, вплив таких початкових геометричних недосконалостей, приводить до необхідності проведення дослідження на моделях з можливо більшим значенням відносної товщини. Очевидно, що при збільшенні відносної товщини δ/R згинальна жорсткість оболонки зростає і, як наслідок, зменшується вплив відносного початкового прогину, як недосконалості геометричної форми, на докритичну поведінку та величину критичного навантаження оболонки. Одночасно з цим зростають критичні напруження і, як наслідок, починає проявлятися інший фактор – поява пластичних деформацій, що зменшує діапазон, а часто і виключає можливість проведення експерименту в пружній області. Початок прояву цього фактора для різних матеріалів визначається відношенням границі текучості до модуля пружності (σ_T/E), як певного граничного значення відносної товщини, який дає можливість уникнути пластичних деформацій. Чим вище значення цього відношення, тим більшим є діапазон випробовування оболонки в пружній області.

З листових металів найбільше значення цей параметр має для широко застосовуваної в експериментальних дослідженнях тонкої нагартованої нержавіючої сталі марки Х18Н9н, для якої $\sigma_T/E \approx 4,0-4,5 \cdot 10^{-3}$, що дозволяє проводити в пружній області дослідження стійкості циліндричних оболонок при навантаженні їх осью стискаючою силою до максимальних значень $\delta/R = 6,5 \div 7,0 \cdot 10^{-3}$.

Для проведення широкомасштабних експериментальних досліджень стійкості циліндричних оболонок ефективним виявилось виготовлення моделей із креслярського паперу марки „В” ДСТ 597-73. Цей матеріал відрізняється досить високою стабільністю і однорідністю механічних характеристик (показників пружності та міцності), а також геометрії листа, хоча і має ортотропію механічних властивостей.

Основні механічні характеристики матеріалу, який використовувався для виготовлення досліджуваних моделей оболонок, визначалися з діаграм „ σ - ϵ ”, побудованих за результатами окремих спеціально проведених експериментальних досліджень, виконаних як на плоских зразках, так і на оболонках за допомогою електромеханічної системи, що дозволяло проводити досить точні вимірювання. Механічні характеристики виявились наступними: модулі пружності $E_x = 6,9 \text{ ГПа}$, $E_y = 3,45 \text{ ГПа}$, $G_{xy} = 1,92 \text{ ГПа}$, коефіцієнти Пуассона $\mu_x = 0,3$; $\mu_y = 0,15$, межі міцності $\sigma_{x,b} = 45 \text{ МПа}$, $\sigma_{y,b} = 30 \text{ МПа}$. Тут, індекси x і y відповідають головним напрямкам ортотропії паперу. Товщина аркуша становила $\delta = 0,00023 \text{ м}$, а її вимірювання проводилося індикатором годинникового типу із ціною поділки шкали 10^{-6} м . Ця величина була практично постійною щонайменше в межах однієї партії паперу. Щільність паперу становила 200 г/м^2 .

У цілому, як показали експериментальні дослідження механічних властивостей, матеріал зазначеної марки паперу („В” ДСТ 597-73) має відношення умовної межі текучості σ_T до модуля пружності E_x у поздовжньому напрямку $\sigma_T/E_x \approx 3,6 \cdot 10^{-3}$, що дає можливість проводити експериментальні дослідження в пружній області на моделях з порівняно великою відотною товщиною (до $\delta/R \approx 6 \cdot 10^{-3}$), а значить за меншого впливу початкових геометричних недосконалостей.

Таким чином, виявляється, що, незважаючи на низькі, у порівнянні з металами, абсолютні значення пружних характеристик паперу, відношення границі текучості до модуля пружності у вибраного в цій роботі для проведення експериментальних досліджень матеріалу виявляється вищим, ніж у більшості інших матеріалів, включаючи і метали, та майже досягає цих показників для високоміцної (високолегованої нержавіючої) сталі. Це дозволяє мати досить широкі межі проведення експерименту в пружній стадії деформування.

Важливою властивістю паперового аркуша є також його висока технологічність, що обумовлює досить просте виготовлення високоякісних практично ідентичних зразків та

підготовки їх до випробувань, а також ефективні методики навантаження та вимірювань, які вдається реалізувати без істотних матеріальних витрат.

Зазначені властивості вибраного матеріалу для виготовлення моделей оболонок дозволяють провести досить широкомасштабні комплексні експериментальні дослідження впливу параметрів пошкоджень на величину критичної сили втрати несучої здатності, які практично неможливо виконати на металевих оболонках.

Серед інших підходів до виготовлення і використання ідентичних моделей для випробувань є використання композитних матеріалів, зокрема, склопластикових циліндричних оболонок, які виготовляються із виконанням вимог масштабного моделювання натуральних конструкцій з двох шарів склотканини ТС 8/3-250, попередньо просоченої сполучником ЕФ-32-301, з укладенням основи склотканини під кутами 0° і 90° , вмістом наповнювача і сполучника відповідно 70% і 30% та отупінню полімеризації 98%. Такі склопластикові моделі оболонок мають надзвичайно корисну здатність до повторних випробувань, що дозволяє одержувати досить достовірну картину всього досліджуваного процесу.

Механічні характеристики та геометричні параметри таких склопластикових оболонок виявились наступними: $E_x = 29 \text{ ГПа}$; $E_y = 16 \text{ ГПа}$; $G_{xy} = 9 \text{ ГПа}$; $\mu_x = 0,21$; $\mu_y = 0,11$; $R = 0,1 \text{ м}$; $L_p = 0,25 \text{ м}$; $\delta = 0,0005 \text{ м}$; $\delta/R \approx 5 \cdot 10^{-3}$.

Виготовлені таким чином моделі оболонок мали досить високий рівень межі пружності матеріалу моделей, що при певних умовах, дозволяло проводити багаторазові (повторні) випробування однієї і тієї ж моделі для дослідження впливу змінюваних параметрів, зокрема, при збільшенні розмірів отворів чи їх кількості, зберігаючи при цьому досить високий рівень стабільності величини критичних зусиль втрати стійкості та практично ідентичну картину хвилеутворення без розшарування або руйнування матеріалу оболонки при повторних випробуваннях в пружній області одних і тих же моделей, що і покладено основним принципом методики дослідження.

Можливості такого багаторазового навантаження обґрунтовувалось додатково. Так, багаторазово проведені навантаження оболонок на низькому, а потім на більш високому рівнях навантаження і далі до втрати стійкості та розвантаження, показали, що розкид величини критичного навантаження при 25-кратному повторному навантаженні, п'ять із яких проводилися до втрати стійкості, становив лише 2,5 %, що і вказувало на досить високу вірогідність результатів експерименту.

Ця властивість була закладена в основу методики випробувань, а саме: дослідження впливу зміни розміру і форми (кругового, квадратного) отвору на величини критичної сили втрати стійкості моделей склопластикових оболонок, яка відбувалася в пружній області в процесі багаторазового повторного використання однієї і тієї ж моделі із заздалегідь відомою величиною базового критичного навантаження.

Результати системних експериментальних досліджень стійкості виготовлених із зазначених матеріалів циліндричних оболонок з отворами різної форми, розмірів, кількості і розташування дозволяють стверджувати про ефективність їх використання. Результати випробувань добре погоджуються (там, де можливі такі порівняння) з відомими даними для моделей оболонок, виготовлених з інших матеріалів.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛА

П.О.Стеблянко

Інститут механіки імені С.П.Тимошенка НАН України

Останнім часом в машинобудуванні спостерігається тенденція до використання нових композиційних матеріалів, у тому числі і сплавів, для яких ефект пам'яті форми матеріалу є суттєвим. Наприклад, до таких матеріалів відносяться деякі сплави алюмінію, титану, нікелю, магнію, цинку, міді. Застосування в сучасних високоточних технологіях машинобудування, медицини елементів конструкцій, виготовлених з таких матеріалів, ставить високі вимоги при прогнозуванні їх міцності. Тому побудова узгодженої системи методів розрахунку нестационарного термо-пружно-пластичного напружено-деформованого стану таких елементів конструкцій і є актуальною проблемою [1-6].

Фундаментальна проблема, на вирішення якої спрямовано доповідь, полягає у всебічному дослідженні та гарантуванні міцності елементів машинобудівних конструкцій, що працюють в умовах значних електромагнітних, теплових та силових навантажень. Конкретна фундаментальна задача в рамках загальної проблеми, вирішення якої передбачається в проєкті, пов'язана зі створенням узгодженої системи методів підвищеної точності для дослідження термоміцності елементів конструкцій, виготовлених з нових функціонально-неоднорідних композиційних матеріалів на основі урахування електромагнітних, теплових та мікромеханічних ефектів.

Пропонується створити узгоджену систему методів дослідження міцності елементів конструкцій із функціонально-неоднорідних композиційних матеріалів, складові яких можуть проявляти ефект пам'яті форми та бути чутливими до виду термонапруженого стану. Розв'язати питання ефективного застосування існуючих та створення нового методу розрахунку нестационарного напружено-деформованого стану функціонально-неоднорідних шаруватих тіл довільної геометричної форми, виготовлених з композиційних матеріалів (нові варіанти різницевого методу та методу кінцевих елементів). Дослідити взаємозв'язані електромагнітні, теплові, механічні процеси, які істотно впливають на конструкційні параметри і міцність з урахуванням тепловідведення в процесі деформування та з врахуванням можливих при цьому фазових змін. Розв'язати на їх основі практичні задачі. Виявити нові механічні ефекти, обумовлені урахуванням ефектів на мікромеханічному рівні. На основі цього вирішити питання раціонального застосування природних матеріалів українського виробництва.

1.Steblyanko P. A. Computational methods in stationary and non-stationary thermal-plasticity problems / P. A. Steblyanko, Yu. N. Shevchenko // Computational Methods in Stationary and Nonstationary Thermal-Plasticity Problems, ETS-Encyclopedia of Thermal Stresses: Springer Verlag. –2014. –№ 7. – P. 630–636

2. Petrov A. Development of the method with enhanced accuracy for solving problems from the theory of thermo-pseudoelastic-plasticity / A. Petrov, Yu. Chernyakov, P. Steblyanko, K. Demichev, V. Haydurov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4/7 (94). P. 25–33.

3.Steblyanko P. Phenomenological Model of Pseudo-Elastic-Plastic Material Under Nonstationary Combining Loading / P.Steblyanko, Y.Chernyakov, A.Petrov, V.Loboda //

Structural Integrity, Vol. 8, Theoretical, Applied and Experimental Mechanics, SpringerVerlag, 2019.- P. 205-208.

4.Steblyanko P. Behaviour Modelling of Pseudo-Elastic-Plastic Material at Non-Stationary Loading / P.Steblyanko, K.Demichev, A.Petrov // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 1: P. 107–128 (2021), DOI: 10.15407/mfint.43.01.0107.

5.Стеблянюк П., Петров О. Нелінійна модель поведінки псевдо-пружно-пластичних сплавів. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць ДНУ ім. О.Гончара. – Випуск 36.– Дніпропетровськ, 2023.– С. 127–141. <https://doi.org/10.15421/4223111>

6. Стеблянюк П.О., Дьомічев К.Е., Петров О.Д. Вигин пластини з функціонально-неоднорідного матеріалу при наявності великих деформацій Опір матеріалів і теорія споруд / Strength of Materials and Theory of Structures. 2023. № 110.– С.447-456 DOI: 10.2347/2410-2547.2023.110.447-456 http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-110/33_110_steblyanko_p.o._domichev_k.e._petrov_o.d.pdf.

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Г. І.Нестеренко ¹, С. І.Бібік ², М. І.Музикін ³

¹*Український державний університет науки і технологій*

²*Державний університет інфраструктури та технологій*

³*Університет митної справи та фінансів*

Сучасний світ надзвичайно залежить від ефективного і надійного транспортування вантажів. У цьому контексті автомобільний транспорт займає визначне місце, забезпечуючи широкі можливості для вантажних перевезень. Швидкість, гнучкість та доступність роблять його незамінним інструментом для перевезення товарів та матеріалів на різних етапах поставок. Однак разом із зростанням обсягів вантажних перевезень на автомобільному транспорті з'являються й нові виклики і ризики, які потребують належної уваги та управління. Необхідно не лише забезпечити безперебійну та швидку доставку вантажів, але й зменшити ризики, які можуть вплинути на безпеку, надійність та ефективність цих перевезень.

Зростання торгівлі та глобалізація є ключовими тенденціями в сучасному світі, які мають значний вплив на розвиток вантажних автомобільних перевезень. Сприяючи взаємному обміну товарами та послугами між країнами, ці процеси стимулюють попит на перевезення великого обсягу товарів на довгі відстані.

Однією з головних причин зростання торгівлі є зниження тарифних бар'єрів та укладання міжнародних торгових угод. Це дозволяє компаніям легше входити на зовнішні ринки та здійснювати міжнародні операції. Зростання економічної активності в різних регіонах світу сприяє збільшенню обсягів товарообігу та потреби в ефективних транспортних рішеннях. Глобалізація також відіграє важливу роль у розвитку вантажних перевезень. Підприємства шукають нові ринки для збуту своїх товарів і встановлюють ланцюжки постачання на міжнародному рівні. Це призводить до зростання зовнішньої торгівлі та потреби в ефективних та швидких перевезеннях на великі відстані.

Зростання торгівлі та глобалізація є одним з ключових факторів, що сприяють розвитку вантажних автомобільних перевезень. За останні десятиліття світова торгівля зазнала значного зростання, а глобалізація призвела до зростання міжнародних бізнес-операцій та змін в логістичних ланцюжках.

Однією з головних переваг автомобільних перевезень є їх гнучкість та доступність. Автомобільний транспорт дозволяє доставляти товари безпосередньо від пункту виробництва до пункту призначення, незалежно від наявності залізничних або морських маршрутів. Це особливо актуально для торгівлі між віддаленими регіонами та країнами, де автомобільний транспорт є найбільш ефективним способом доставки товарів.

Зростання міжнародної торгівлі також стимулює розвиток міжнародних дорожніх мереж та інфраструктури. Інвестиції у будівництво та підтримку автомагістралей, мостів та тунелів сприяють поліпшенню доступності та швидкості доставки вантажів. Зростання торгівлі та глобалізація ставлять перед вантажними автомобільними перевезеннями виклики та можливості. З іншого боку, зростання торгівлі та глобалізація відкривають нові можливості для розвитку вантажних автомобільних перевезень. Завдяки розвитку технологій та комунікацій, стає можливим впровадження інноваційних систем вантажних перевезень, таких як автоматизовані системи моніторингу, оптимізації маршрутів та управління парком автомобілів.

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE THERMOSTRESSED STATE OF SEMITRANSSPARENT SOLIDS WITH CAVITIES SUBJECTED TO THERMAL RADIATION

O.R. Hachkevich¹, O.B. Humenchuk¹, A. Kozyarska¹, R.F. Terletskyi²

*¹Institute of applied problems of mechanics and mathematics
of the National Academy of Sciences of Ukraine; ²Opole Polytechnic (Poland)*

The model of radiative thermomechanics for semitransparent solids with constructive cavities is developed. Various thermal and mechanical properties of a material in the cavity are considered. There are both cooled and non-cooled radiation reflectors around the irradiated solid. Different approaches to determination radiative characteristics of irradiated solid, radiation source and reflector are used, namely, spectral and integral characteristics are applied. Effect of radiation on thermal and mechanical processes in the solid is taken into account by heat sources due to radiation absorption as well as radiative heat energy redistribution in the solid-reflectors system.

MODELING OF ROTATION IN A RESISTIVE MEDIUM OF AN ELASTIC SOLID BODY WITH CAVITIES CONTAINING LIQUID, IN THE FORM OF A SYSTEM OF TWO AND THREE ELASTICALLY COUPLED RIGID BODIES WITH LIQUID

Yu.M. Kononov

Institute of Applied Mathematics and Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Slovyansk, Ukraine

Based on the known equations of motion of the gyrostat system, P.V. Kharlamov and the function of the state S.L. Soboleva obtained the equation of the perturbed motion of three rigid bodies with an ideal fluid in the form of a countable system of ordinary differential equations. In the case of Lagrangian gyroscopes with arbitrary axisymmetric cavities, a transcendental characteristic equation is obtained. Taking into account the fundamental tone of fluid oscillations, conditions for the asymptotic stability of uniform rotations of two and three Lagrangian gyroscopes with fluid are obtained and analytically studied.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF LOOSENING OF ISOTROPIC MATERIAL IN AXISYMMETRIC SPATIAL AND SHELL ELEMENTS OF STRUCTURES

M.O.Babeshko, V.G.Savchenko

The S.P.Timoshenko Institute of Mechanics of the NASU

A method of solving thermoplasticity problems for spatial bodies and shells of revolution in the processes of non-axisymmetric non-isothermal loading, taking into account the stress mode and plastic loosening of isotropic material, has been developed. The constitutive equations contain two nonlinear dependencies, one of which connects the first invariants of the stress and strain tensors, and the other connects the second invariants of the corresponding deviators. Using the example of a thin shell, it is shown that the consideration of plastic loosening changed the calculation results by 20-40%.

TURBULENCE MODELS IN NUMERICAL METHODS FOR DETERMINATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF VEHICLES

A. V. Sokhatskyi

*Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine
University of Customs and Finance*

Real vehicle movement occurs in a turbulent air environment. Modeling of turbulent movements of air masses is a fundamental problem of both theoretical physics and practical

aerodynamics. The absence of a universal theory for describing turbulent flows creates problems with determining aerodynamic loads]. This issue is one of the key points in the design of high-speed land vehicles, since at high speeds, overcoming air resistance alone can account for up to 90% of total energy consumption. Thus, fundamental research is needed in the aerodynamics of high-speed ground transportation.

We consider methods for modeling turbulent flows. They can be divided into three groups with a certain degree of conventionality: approaches based on the use of the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS); two classical approaches - Direct Numerical Simulation (DNS) and Large Eddy Simulation (LES); hybrid approaches based on the joint use of RANS and LES approaches for different flow regions.

ON THE STABILITY OF ROTATION ON THE SUSPENSION OF A LAGRANGE GYROSCOPE WITH AN IDEAL FLUID

Yu.M. Kononov, O.V. Nesmelova, Ya.I. Svyatenko

Institute of Applied Mathematics and Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Slovyansk, Ukraine

The problem of the stability of uniform rotations on the suspension of a Lagrangian gyroscope with an ideal fluid in a medium with resistance and in the absence of dissipation is considered. Taking into account the fundamental tone of vibrations of an ideal fluid, the conditions of asymptotic stability were obtained. Analytical studies of the effect of fluid, elasticity of hinges, mass and inertial characteristics of the suspension on stability conditions were carried out. The obtained conditions are compared with stability conditions in the absence of dissipation.

СИСТЕМИ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТАР ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНОСФЕРИ

Ю.С.Тарасенко, Г.Є.Ященко

Університет митної справи та фінансів, Дніпро

У роботі розглянуто можливість підвищення експлуатаційної надійності переміщення транспортних об'єктів (в умовах апріорної неоднозначності впливу навколишнього середовища на процес отримання, обробки, зберігання та передачі інформації) за задекларованими сегментами блискучих точок у вигляді радіолокаційних портретів (тобто діаграм розподілу ближнього розсіяного поля) з використанням штатних елементів кіберфізичних систем (КФС) [1]. Останні, як правило, включають інженерно-взаємодіючі мережі фізичних та обчислювальних

компонентів, тобто через комп'ютерні мережі та вбудовані контролери забезпечується (автономно або за участю людини) управління фізичними процесами за допомогою реалізації зворотних зв'язків [2, стор. 34]. У міських умовах експлуатації транспортних засобів функціональна автономність та мобільність таких сучасних КФС, з наявністю засобів вимірювання з програмним забезпеченням, дозволяє здійснювати гідний контроль довкілля за допомогою вимірювання (отримання або сприймання), зв'язку (в режимі прийому-передачі), керування (дистанційного), обробки (опрацювання зворотних зв'язків) і запам'ятовування та збереження інформації [3]. При цьому очевидно, що інтегральне використання оптико-радіолокаційної геотехнології (як всепогодної [4,5]) здатне оптимізувати транспортну логістику насамперед за допомогою точкових одиничних відбивних поверхонь, які (кутові та лінзові відбивачі) широко використовуються у радіозв'язку, метеорології й навігації. Так, основна властивість кута (наприклад, тригранного) – здатність направляти промінь після трьох перевідбиттів у зворотному напрямку до падаючого променя за збереження фронту хвилі плоским. Максимум зворотного відбиття збігається з напрямком, що утворюють рівні кути із гранями куточка. У разі відхилення осі кута від напрямку падіння хвилі на 20° зберігається приблизно половина максимального відбиття. Однак, оскільки в тригранному кутовому відбивачі здійснюється відбиття від трьох металевих поверхонь, кожна з яких змінює напрямок обертання поляризації на зворотний, то напрямок обертання у відбитому сигналі змінюється також на зворотний. Отже, радар із круговою поляризацією не виявить цілей, синтезованих із тригранних куточків, але зафіксує сигнали, відбиті двограними кутами. Для створення сильних відбивань кутові відбивачі об'єднують у групи. Лінзові же відбивачі, зокрема лінзи Люнеберга з відбивальним екраном, дозволяють одержати діаграму ЕВП (ефективна відбивна площа) у більш широких межах азимута й кута місця, ніж кожний з поодиноких кутових відбивачів. Звичайну лінзу виготовляють у вигляді суцільної діелектричної кулі, яка складається з шарів матеріалу, показники заломлення яких підібрані таким чином, щоб забезпечити на поверхні сфери, протилежної фронту падаючої хвилі, фокусування зондувального електромагнітного поля. Тоді, поміщаючи металевий відбивальний екран у фокус, можна забезпечити відбиття поля у вигляді, аналогічному падаючому полю, оскільки відбиті промені повторюють шлях падаючих. Як правило, змінюючи розміри відбивального екрана, можна змінювати ширину діаграми ЕВП відбивача. Так, для екрана розміром близько одного квадранта окружності ширина діаграми ЕВП складе приблизно $\pm 45^\circ$, і вона буде симетрична у вертикальній та горизонтальній площинах.

В умовах проживання на високоурбанізованих територіях сучасна транспортна техносфера, що переходить у фазу діджиталізації (від англ. «digitalization», де «digital» у перекладі – це «цифровий», та, разом із суфіксом «ization», тобто.- «ізація», означає «цифровізацію») з одного боку, як би спрощує безпосередню реалізацію супутнього групування (мультиплексування) цифрових інформаційних сигналів і підвищує (принаймні, не погіршує) завадостійкість їх транспортування, але, з іншого боку, потребує оптимізації як цифрових, так і інноваційних комунікаційних технологій. Причому в даному аспекті сьогодні можна стверджувати, що характерною особливістю такої сучасної техносфери Землі є поширення геоінформаційного технологічного інструментарію з інтелектуальними елементами транспортної системи. Насамперед, завдяки появі та сучасному розвитку робототехніки (її інформаційним пристроям та системам у вигляді оптико-електронних приймачів випромінювання, компактних телекамер, відеопроцесорів, датчиків відчуття, технічного зору як різновиду інформаційних систем мехатроніки тощо), оптоелектроніки та сучасних активних радіолокаційних станцій (РЛС) повітряного, наземного та космічного базування з

надвисокою роздільною здатністю. Такі РЛС забезпечують отримання зображення об'єктів, що локуються, порівняні за детальністю з фотозображеннями. Однак, на відміну від оптичних систем, радіолокатори з синтезованою апертурою антени (як системи радіобачення) дозволяють отримувати зображення об'єкта та проводити його моніторинг незалежно від метеоумов та природного освітлення на значному видаленні в широкій зоні огляду, причому найчастіше невидимих в оптичному діапазоні довжин хвиль [4,5].

Завдяки такому функціонуванню радіолокаційного моніторингу в сукупності з використанням нових інформаційних технологій (насамперед, геотехнологій) можливе отримання оперативної, детальної та повної інформації про певну ділянку місцевості та об'єкти з генеруванням тривимірного зображення з будь-яким дозволом для сучасної транспортної системи. На жаль, викладене вище є лише необхідною умовою успішної реалізації безпілотного транспорту, особливо електротранспорту, в умовах міської сфери експлуатації, де визначальним вагомим критерієм є дорожньо-транспортний травматизм. До теперішнього часу, завдяки розвитку нанотехнологій, рівню обчислювальної техніки з її програмним сервісом, сучасним комплексним технологіям з управління дорожнім рухом, завдання реалізації роботизованого інтелектуального міського громадського транспорту на базі безпілотних мобільних роботів можна вирішити. Підтвердженням цьому є реальні досягнення в галузі створення елементів (об'єктів, пристроїв, інструментарію тощо) штучного інтелекту як наукового напрямку, в рамках якого ставляться та вирішуються завдання моделювання та реалізації конкретних видів людської діяльності. У даному аспекті – це завдання реалізації безпілотного транспорту (насамперед міського електротранспорту з його стабільною техносферою експлуатації) та створення його надійної системи управління.

1. Тарасенко Ю.С., Клим В.Ю. Кіберфізичні системи ближньої взаємодії об'єктів критичної інфраструктури в умовах діджиталізації. Міжнародна науково-практична конференція «Економіко-правові та соціально-технічні напрями еволюції цифрового суспільства». Секц. «Інформаційні та транспортні технології: вектори розвитку та актуальні проблеми діджиталізації» 02 червня 2022 р., м. Дніпро.
2. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення / Ван Чунжі, С. П. Яцишин, О. В. Лиса, А.-В. В. Мідик // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. Том 79. № 1. С. 34–38.
3. Голембо В. А. Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем [Текст] / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов // Матер. Другого наук. семінару “Кіберфізичні системи: досягнення та виклики”, НУ «Львівська політехніка», Львів, 21-22 червня, 2016. – С.68 – 74.
4. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга : учебник / А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Д. Д. Дмитриев [и др.] ; под общ. ред. И. Н. Ищука. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. - 292 с.
5. Тарасенко Ю.С. Фізичні основи радіолокації [Текст]: навч. посіб. Т 19 / Ю.С. Тарасенко. – Д.: «Пороги», 2011. – 487с.

IDENTIFICATION OF MOMENTS OF INERTIA OF A RIGID BODY

N. V. Zhogoleva, V.F. Shcherbak

Institute of Applied Mathematics and Mechanics NAS of Ukraine, Slavyansk, Ukraine

The problem of experimentally determining the inertia tensor of a body of arbitrary shape is a technically complex task. At the same time, these quantities are included in the laws of motion of mechanical objects and may change during the movement. The model problem of online determining the main moments of inertia of a rigid body with a fixed point from information about its angular velocity is considered. The solution is carried out using the synthesis of invariant relations in extended phase space and consists of obtaining additional equations connecting the components of a mathematical model.

MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN A LAYERED BASE WITH INITIAL STRESSES

Y.P. Glukhov

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine

This work is devoted to the study of the influence of the protective coating, initial stresses, mechanical characteristics of materials, movement parameters of the surface load on the stress-deformed state of the elastic base. The relevance of the research results is related to the possibility of their use in the creation of qualitatively new materials, structures and building structures. A prestressed incompressible half-space with inhomogeneity in the form of a thin surface layer is considered. The concentrated force moves along the free surface of the protective layer at a constant speed at a certain angle to the surface of the half-space. The solution of the problem was obtained using the method of integral Fourier transformations. Analytical results are given in a general form for materials with an arbitrary elastic potential, for cases of unequal and equal roots of characteristic equations, for various conditions of combination of elements of a layered medium and for any speed of movement of the load. The material with the Bartenev-Khazanovich potential was considered for numerical analysis. The calculations were carried out within the framework of the theory of finite initial deformations. The impact of the moving load, initial stresses and mechanical parameters of the elements of the layered base on the main characteristics of its stress-strain state was studied.

PROPAGATION OF ELASTIC TORSIONAL WAVES ALONG LAYERS OF AN INCOMPRESSIBLE COMPOSITE MATERIAL WITH INITIAL STRESSES

A.Y.Glukhov , Y.P.Glukhov

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine

In this work, studies of the propagation of elastic torsional waves in a layered composite incompressible material with initial stresses during sliding of the layers were carried out. The research was carried out within the three-dimensional dynamic linearized theory of elasticity for bodies with initial stresses.

A layered composite material with initial stresses consists of two types of alternating layers. Materials and initial stress-strain states are the same for the considered type of layers. At the interfaces of the layers, only the stresses and displacements normal to the layers are continuous, and all the tangential stresses are zero. The initial stress state is considered as homogeneous.

The study of the regularities of the propagation of elastic torsion waves in layered composite materials with initial stresses is reduced to the construction of solutions to the equation of motion when the boundary conditions on the planes of separation of layers and conditions of Floquet periodicity are satisfied.

The propagation of torsional waves in the radial direction in a layered composite material with initial stresses is considered. Dispersion equations and their long-wave approximations were obtained for symmetric and antisymmetric waves propagating along layers of incompressible composite material. Analytical results are presented in a general form for materials with an elastic potential of arbitrary shape. The analysis of the equations shows that during the propagation of waves there is an interaction between the layers of the composite.

ПРО ОБЧИСЛЕННЯ ТОЧКИ РОСИ В ТАБЛИЦЯХ EXCEL

В.А. Максимюк, Н.В. Максимюк

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Точка роси є важливою характеристикою вологості повітря у будівництві, навігації, життєдіяльності та ін. Хоча поняття точки роси вивчається в школі, але простої явної формули, яка б виражала з належною точністю абсолютну температуру точки роси T_d через відносну вологість U та фактичну температуру T , не існує. Натомість користуються психрометричними таблицями [1]. Онлайн калькулятори дозволяють розраховувати точку роси, але тільки для одного заданого набору параметрів, що затрудняє її використання для широкого масиву даних в таблицях. Крім того в більшості з них закладено спрощені формули.

Основою для розрахунку точки роси є формула, яка визначає парціальний тиск E_w насиченої водяної пари над плоскою поверхнею води залежно від температури T . Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) рекомендувала (1988) використовувати так звану психрометричну формулу Гоффа (1957) [2]. Цю дещо громіздку формулу можна подати у вигляді:

$$\lg E_w = a \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) + f(T), \quad (1)$$

де E_w – тиск в ГПа, $a = 10,79574$; $T_1 = 273,16$ К ($t_1 = 0,01^\circ\text{C}$) – потрійна точка води, а вигляд функції $f(T)$ впливає з порівняння з оригіналом [1, 2].

Записуючи двічі формулу (1) для фактичної температури T і для температури точки роси T_d , логарифмуючи означенням відносної вологості $U = e_w/E_w$, отримаємо трансцендентне рівняння визначення точки роси для заданої фактичної температури T та відносної вологості U [3]:

$$\lg U = a \left(1 - \frac{T_1}{T_d} \right) + f(T_d) - a \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) - f(T). \quad (2)$$

Розв'язати (2) відносно невідомої величини $x = T_d$ можна чисельно методом простої ітерації

$$x_1 = T, \quad x_{n+1} = a T_1 / \left(a \frac{T_1}{T} - \lg U + f(x_n) - f(T) \right). \quad (3)$$

Алгоритм (3) реалізовано в електронних таблицях Excel. Для цього розміщуються у клітинках:

A1 – значення фактичної температури $t = T - 273,15$ за Цельсієм;

B1 – значення відносної вологості $u = 100U$ в процентах;

C1 – формула $=A1+273,15$ для обчислення абсолютної температури $T = t + 273,15$;

D1 – формула $=IF(D1=0;C1;10,79574*273,16/(10,79574*273,16/C1-LOG10(B1/100)-5,028*LOG10(D1/C1)+0,000150475*(10^{(8,2969*(1-C1/273,16))-10^{(8,2969*(1-D1/273,16))})+0,00042873*(10^{(4,76955*(1-273,16/D1))-10^{(4,76955*(1-273,16/C1))})})$ для розрахунку точки роси $T_d = x$ за алгоритмом (6);

E1 – формула $=D1-273,15$ для обчислення точки роси $t_d = T_d - 273,15$ за Цельсієм.

Крім того для зупинки ітераційного процесу за досягнення належної точності були встановлені в Excel такі параметри обчислення (Calculation Options): граничне число ітерацій – 5; відносна похибка – 0,001; опція обчислення – автоматично.

Відмітимо, пізніше ВМО [4, с. І. 4-33] запропонувала простішу емпіричну формулу Магнуса, а також спрощену явну формулу для точки роси, яку використовують більшість онлайн калькуляторів.

Література

1. Психометрические таблицы / Сост. Д. П. Беспалов, В. Н. Козлов, Л. Т. Матвеев. – Л: Гидрометеиздат, 1972. – 238 с.
2. Goff J.A. Saturation pressure of water on the new kelvin scale // Amer. Soc. Heat. Vent. Eng. Trans. – 1957. – 63. –Р. 347–354.
3. Максимюк В.А., Максимюк Н. В. Про алгоритм розрахунку точки роси на основі формули Гоффа // Збірник матеріалів Всеукраїнської заочної науково-практичної інтернет-конференції «Прикладна математика та комп'ютерні науки», м. Маріуполь, 28 лютого 2020 року. – Маріуполь: Донецький державний університет управління, 2020. – С. 13 – 16.

4. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений – ВМО-№ 8 – Женева, 2014. – 788 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ДОРОЖНІХ УМОВ

О.М Давидчик, А.П Коваленко, В.А. Коваленко

*ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки
Українського державного університету науки і технологій»*

В роботі виконаний аналіз дорожнього покриття на дорозі Т0441 Кам'янське – Лобойківка Н31 – Петреківка – Царичанка Н31, яка згідно дорожно-кліматичного районування України [4], відноситься до центральної дорожньо-кліматичної зони. Довжина маршруту – 54.3 км. Розглянуті сучасні методи оцінки ефективності використання палива Основним вимірником паливної економічності автомобіля в нашій країні і в більшості європейських країн є витрата палива в літрах на 100 км пройденого шляху. Дослідження витрати палива проводили на автомобілі MAN TGX 18.440, який являє собою сидельний магістральний тягач із колісною формулою 4х2. Приведена його технічна характеристика та характеристика ділянки дорожнього покриття Шляхом замірів нерівностей дорожнього покриття було визначено його стан а також за допомогою бортового комп'ютера автомобіля середня витрата палива. Випробування проводяться на рівній горизонтальній ділянці дороги з удосконаленим покриттям. Рух здійснюється на різних передачах, починаючи з максимально можливою швидкістю до мінімально стійкої. Проміжні значення швидкості повинні бути кратні десяти. Паливна характеристика усталеного руху використовується також для дослідження впливу на витрату палива різних факторів. Заміри витрати палива і часу руху виробляються в моменти перетину початку і кінця вимірювальної ділянки. Обсяг і умови проведення випробувань автомобілів на паливну економічність обумовлені в ГОСТ 20306-90 і в технічній документації на автотранспортний засіб (АТЗ) підприємства-виготовлювача. Умовно стан дорожнього покриття визначено за кількістю та глибиною ям, тріщини та пошкоджень на ділянці 10 м² для цього використовували стандартний коробок від сірників (розмір - 51x37,5x12,5 мм ДСТУ 1820: 2004). Якщо ділянка дороги має яму в яку вертикально стає коробок , або площа вибоїн перевищує 10 м², при цьому приходиться знижувати швидкість руху до 10 –20 км/год. – поганий стан. Коробок стоїть під кутом, або площа вибоїн до 5 м², при цьому приходиться знижувати швидкість руху до 20 –30 км/год – задовільний стан. Ями відсутні є незначні пошкодження дорожнього полотна (невеликі тріщини) швидкість руху практично незмінна (не враховано виконання маневрів) – добрий стан. За результатами дослідження на ділянках доріг був визначений стан, середня швидкість та витрата палива за бортовим комп'ютером. За отриманими даними виконаний математичний аналіз залежності витрат палива від стану дороги та залежності швидкості від стану дороги.

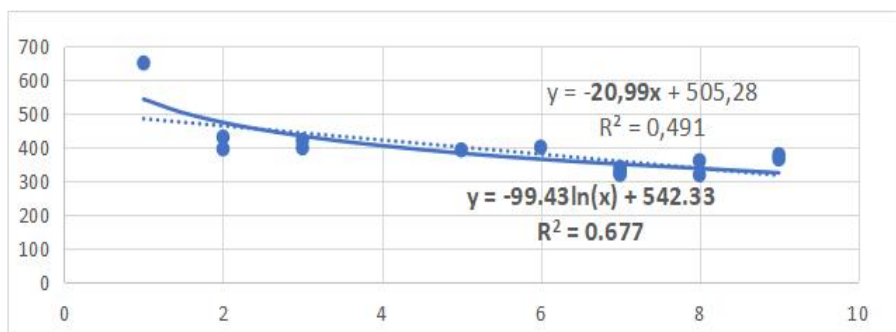


Рис. 1 Залежність витрат палива від стану доріг

Доцільно дослідити залежність витрат палива від стану дороги і швидкості. Отримано (x_2 – стан дороги, x_1 – швидкість, Y – витрати палива)
 $R^2=0,70775$ і $Y=-72,78x_1-2,85 \ln(x_2)+579,15$.

За допомогою функціональної залежності можна спрогнозувати витрати палива в залежності від стану дороги та швидкості.

Список використаних джерел:

1. Говорущенко Н.Я. (2011) Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследования). Харьков: ХНАДУ.
2. ГОСТ 20306-90 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Motor vehicles. Fuel economy. Test methods». Вилучено з <http://surl.li/qiejy>
3. Вимірювачі і показники паливної економічності. норми витрати палива: веб-сайт. URL: https://stud.com.ua/162617/tehnika/vimiryuvachi_pokazniki_palivnoyi_ekonomichnosti_normi_vitrati_paliva
4. Споруди транспорту; Автомобільні дороги [Текст]. - К. : Мінрегіонбуд України, 2016 . - (Державні будівельні норми України). Ч. 1, 2 : ДБН В.2.3-4:2015. - Проектування (ч. 1). - Будівництво (ч. 2). - На заміну ДБН В.2.3-4:2007; чинні від 2016-04-01. - [Б. м.] : [б.в.], 2016. - 104 с. - Бібліогр.: с. 100.
5. Технічні правила ремонту і утримання вулиць та доріг населених пунктів : Офіційний вісник України. 2021 р., № 12. 16 лютого. Вилучено з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0365-12#Text>

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ДО ПРИМІЩЕННЯ НА МІКРОКОНТРОЛЕРІ ARDUINO

Р.О. Харченко, О.М. Гулєша

Дніпровський державний технічний університет

У доповіді подано процес виготовлення, налагодження діючого макета пристрою контролю доступу до приміщення на мікроконтролерному управлінні. У

першої частині роботи було визначено ідею та структуру власного пристрою розробки, було розглянуто актуальність проблеми виготовлення мікропроцесорного пристрою контролю доступу до приміщення на мікроконтролерному управлінні, проведено аналіз існуючих приладів, варіанти ідентифікації об'єктів і їх початкові конфігурування та досліджувалися принципи роботи і ефективність існуючих пристрою контролю доступу до приміщення. У другій частині роботи було розроблено мікропроцесорний пристрій контролю доступу до приміщення за допомогою Arduino Uno. Проведена інтеграція комплексної системи на основі вибраних компонентів: побудовано архітектуру функціональної схеми пристрою; розроблено базовий прототип схеми на макетній платі; виконано програмну реалізацію проекту; тестування пристрою. Мікропроцесорний пристрій моделює основні функції контролю за різними датчиками та пристроями, що входять до периферії електронної системи. Макет електронного замку дозволяє змодельовати основні функції та завдання контролю доступу в різні приміщення за допомогою введення кодової комбінації через матричну клавіатуру, або радіочастотної мітки, яка використовується як ключ – карта. Модуль реле та підключений до його контактів електромагніт симулюють відкритий або закритий стан дверей у приміщення. Для зручного підключення різних модулів до мікроконтролера Arduino використовується спеціальна макетна плата, на якій можна розташовувати елементи схеми та з'єднувати їх проводами з мікроконтролером. На основі цієї плати була створена схема, яка зображена на рисунку 1.

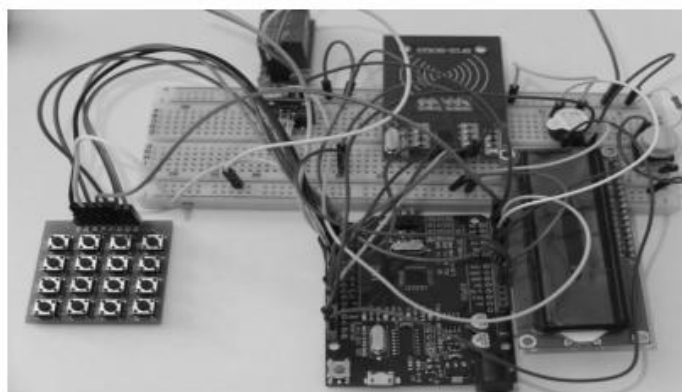


Рис. 1. Повна схема пристрою контролю доступу

Усі елементи на схемі правильно підключені до мікроконтролера відповідно до принципових схем, які були розроблені у спеціалізованих програмах моделювання, таких як Autodesk Circuits та Fritzing. Ці програми дозволяють моделювати схеми, перевіряти їх працездатність та визначати оптимальні способи з'єднання елементів. Під час практичної роботи і розробки моделі електронного пристрою контролю доступу виникли деякі проблеми, а також з'явилися нові ідеї щодо модернізації програмної частини. Серед змін, які були внесені:

1. Заміна бібліотеки RFID: Була здійснена заміна робочої бібліотеки RFID з Rfid.h на MFRC522. Нова бібліотека має більший функціонал, що полегшує роботу з RFID-мітками.

2. Додавання функції squeaker (): Була додана окрема функція squeaker (), яка дозволяє зручно налаштовувати п'єзодинамік і спрощує його використання.

3. Робота з дисплеєм LCD1602: Використовуючи додаткові входи SDA і SCL на платі Arduino UNO R3, пристрій може працювати за протоколом I2C з дисплеєм LCD1602. Це дозволяє виводити інформацію на дисплей, використовуючи кирилицю завдяки бібліотеці LCD_1602_RUS.h.

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВІДОБРАЖЕННЯ ЧАСУ У ПРИМІЩЕННІ

О.В. Живодьор, О.М. Гулєша

Дніпровський державний технічний університет

У доповіді подано процес розробки частотоміра на основі мікроконтролера ATTiny2313. Використання мікроконтролерів у цифрових пристроях дозволяє значно зменшити їх габарити, споживану потужність та кількість часу на розробку та виготовлення. Також, при використанні мікроконтролера, збільшується швидкодія та розширюється функціонал цифрового пристрою. Вимірювання частоти сигналу є однією з основних операцій при роботі у дослідницькій лабораторії. Дуже важливо знати з певною точністю частоту, наприклад, опорного кварцового генератора, або радіопередавача. Сучасні мікроконтролери дозволяють з мінімальними затратами часу та матеріалів розробити достатньо точні прилади для вимірювання частоти.

В роботі було розглянуто будову та принцип дії електронних лічильників, а також основні принципи побудови стандартних лічильників та їх функції і основні параметри, що визначають роботу стандартного електронного лічильника. Описано види похибок вимірювання частоти. Розроблено структурну схему (рис. 1) пристрою для вимірювання частоти сигналу. Обґрунтовано вибір типу мікроконтролера для приладу вимірювання частоти. Розроблено алгоритм вимірювання частоти та описано керуюча програму.



Рис. 1. Структурна схема пристрою

Вхідний сигнал проходить через обмежувач амплітуди на широкосмуговий підсилювач. Потім посилений синусоїдний сигнал надходить на тригер Шмітта, з виходу якого вже прямокутний сигнал надходить на вхід тригера типу D. З виходу тригера типу D надходить прямокутний сигнал із коефіцієнтом заповнення 2 і частота вдвічі менша за вхідний сигнал надходить на вхід мікроконтролера, який підраховує кількість імпульсів, що надходять за одиницю часу, і виконує всі необхідні арифметичні перетворення. Мікроконтролер також має тактовий генератор, частота якого визначається кварцовим резонатором. Тактовий генератор формує керуючі імпульси з певними часовими характеристиками і забезпечує правильність вимірюваних показників. Результат вимірювання відображається на семисегментному шестирозрядному світлодіодному індикаторі методом динамічного відображення.

Проведено математичне моделювання роботи частотоміра в стимуляторі Protheus 8. Результати моделювання показують, що підрахунок імпульсів і

відображення частоти вхідного сигналу відповідає його реальній частоті (рис. 2). Програму керування також можна оновити, щоб розширити робочий діапазон частот і роздільну здатність лічильника.

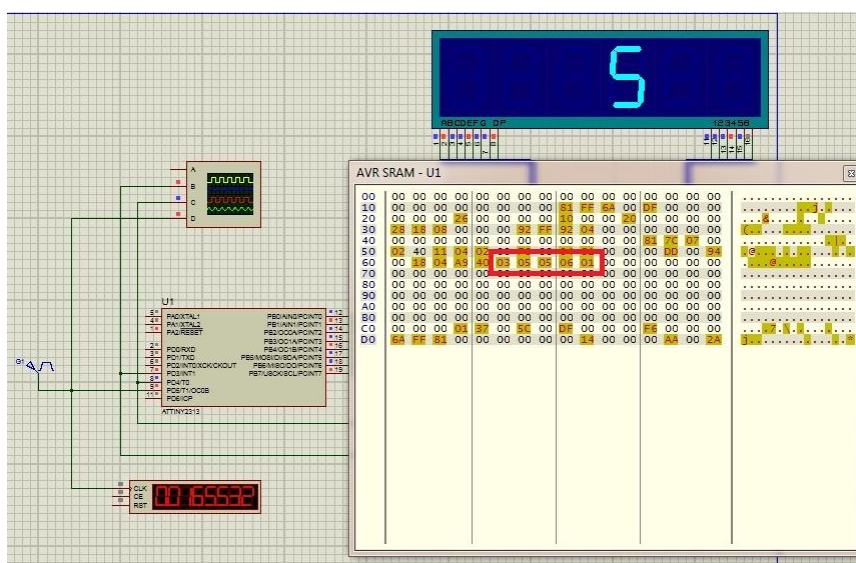


Рис. 2. Результати моделювання розробленого пристрою

СТРУКТУРУВАННЯ АСПЕКТІВ ПІЗНАННЯ

Ю.С.Тарасенко¹, П.А.Стеблянко², Н.І.Максимчук¹

¹Університет митної справи та фінансів,

²Інститут механіки імені С.П.Тимошенка НАН України

Зазвичай створення педагогом конспекту нового курсу лекцій сприймається ним як майбутня здача екзамену перед студентським соціумом. Причому традиційне озвучування (яке корелює з мотиваційною престижністю отримуваної освіти, рівнем початкової підготовки слухачів, попереднім засвоєнням раніше вичитаних дисциплін і складністю сприйняття студентством через надмірний об'єм, малої кількості часу, що відведено на вивчення, фізично-математичного перенавантаження викладання і т.д.) навіть вступного опису у вигляді узагальнюючої структурно-лінгвістичної схеми (СЛС) за матеріалом учбової дисципліни вимагає серйозної педагогічної майстерності і часу на підготовку відповідної презентації. При цьому, реалізація інформаційно-лінгвістичного складу такої СЛС повинно відповідати нормативним галузевим чи державним вимогам відповідного профілю підготовки, які, у свою чергу повинні корелювати з міжнародними ISO/IEC, наприклад [1,2].

Так, у якості прикладу, на рис.1 наведена пізнавально структурно-лінгвістична схема методології побудови системи захисту та безпеки об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), яка адаптована з [3,4]. Остання, «з позицій стандартів України, які мають аналоги у межах ISO щодо оцінювання супутніх ризиків згідно фізичної та інформаційної безпеки», дозволяє забезпечувати «скоординовані дії з керівництва та управління організацією в області ризику», оцінювання ризику безпеки сукупності об'єктів критичної інфраструктури (СОКІ) та доступу до неї з позицій зниження результативності ризиків. При цьому, із врахуванням вибору критеріїв ризику та

«ступеню реалізації запланованих робіт і досягнення запланованих результатів» (тобто результативності [5, п.3.7.11]) розглянути підсистеми: стандартів України [6 - 9] загального оцінювання ризику, які є аналоги у межах ISO; методів загального оцінювання ризику згідно IEC/ISO 31010 2013 (Додаток В) [7]; оцінювання втрат безпеки згідно ДСТУ ISO/IEC 27000:2019 (конфідентності, цілісності, доступності, спостережності, автентичності, надійності [10] та стійкості рубежів захисту [2]); фільтрації даних ризиків, згідно ДСТУ ISO/IEC 27001:2013 та підтримки прийняття рішень (ПсППР) доступу до СОКІ [11, Ст.1, п.1, поз.9].

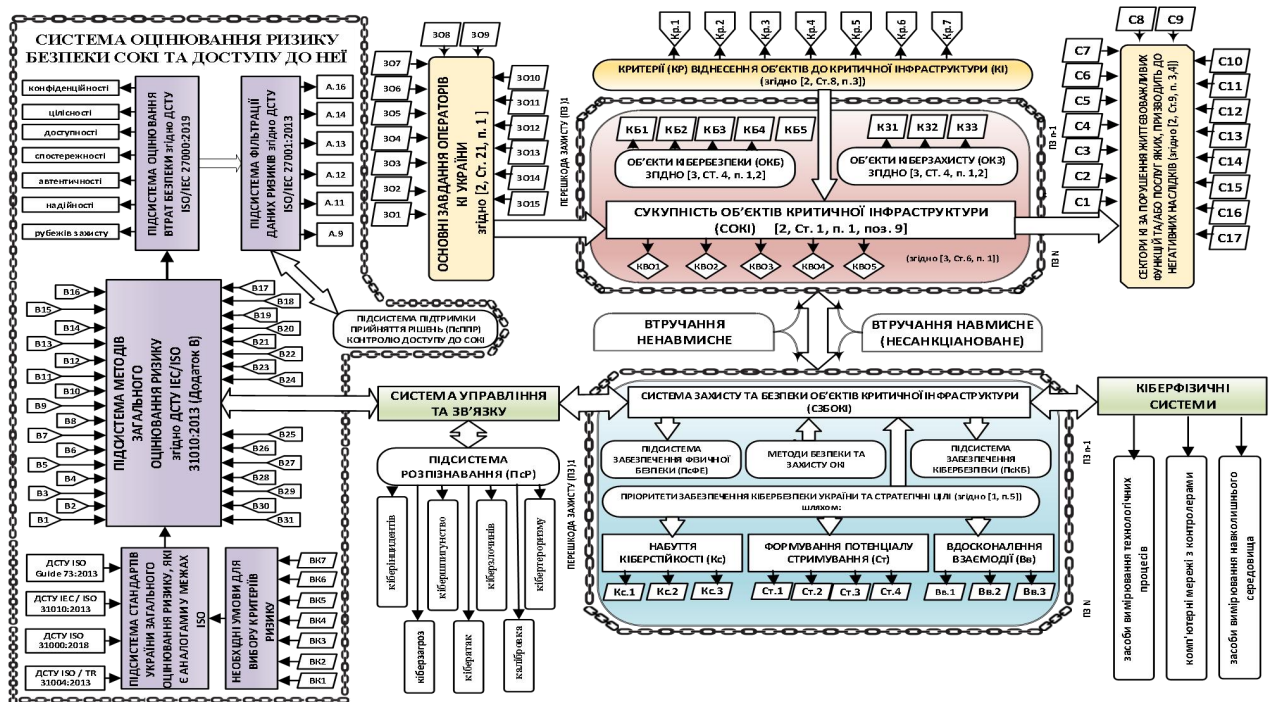


Рис. 1 - Структурно-лінгвістична схема (СЛС) методології побудови Системи захисту та безпеки об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) з позицій зниження результативності ризиків

Варто відмітити, що таке структурне представлення об'єкту пізнання у вигляді ОКІ сприяє не тільки росту значимості і актуальності учбової дисципліни, яка вивчається серед студентства, але і значно мобілізує увагу слухачів на основоположні її пізнавальні аспекти та інформаційну життєдіяльність соціуму.

У подальшому, створена та наведена на рис. 2 СЛС «Безпеки іносфери (інформаційного простору) з акцентом на захист інформаційної життєдіяльності соціуму» дозволяє студенту оцінити увесь необхідний об'єм пізнання за спеціальними дисциплінами, їх повноту побудови і логічність викладення. Більше того, з'являється можливість конструктивного аналізу запозиченого матеріалу при створенні такої СЛС та використовуваних понять, згідно нормативних документів. У першу чергу це стосується таких понятійних тонкощів, як: безпека чи захист при їх різноманітних рівнях забезпечення; технічні, програмні, програмно-технічні чи апаратні засоби; концепція – принципи – політика безпеки, наприклад, інформації до різних елементів її захисту (фрагментарні та/або комплексні підходи і т.д.).

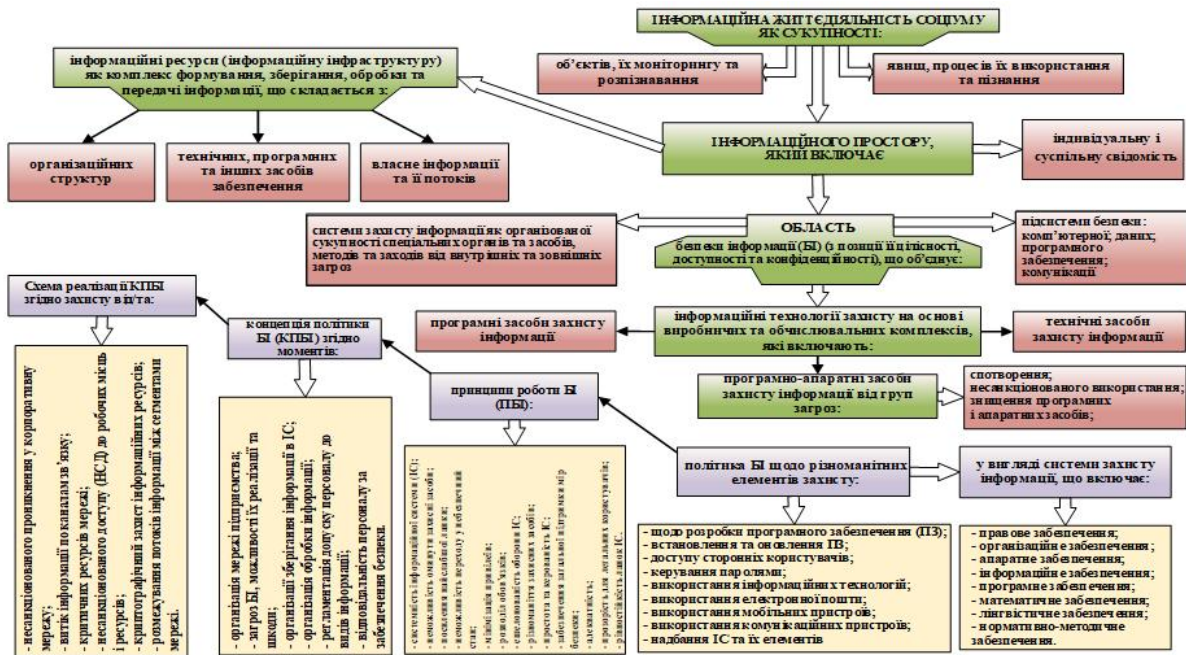


Рис. 2 - СЛС безпеки іносфери (інформаційного простору) з акцентом на захист інформаційної життєдіяльності соціуму

Очевидно, що завжди серед студентської аудиторії знайдеться такий допитливо-пізнавальний, який, у залежності від свого рівня вихованості, у тій чи іншій формі, буде вимагати від лектора відповіді на питання «що є першим – курка чи яйце?». Якщо ж цього і не станеться, то викладач повинен сам потривожити «мурашник» і визначити в якому напрямку викладати покладений на нього лекційний матеріал, - з програмно-технічним (якщо такий існує), чи програмно-апаратним акцентом викладання конкретно запропонованої дисципліни.

Таким чином, настільки коротке викладення у вигляді презентацій рис.1 і 2, як представлення вступного лекційного матеріалу, дозволяє забезпечувати, з одної сторони, спадковість з раніше викладеними спеціальними дисциплінами, а з іншої сторони, неперервність пізнавального процесу з обраної спеціальності. Очевидною є і наступна суть викладення матеріалу з позицій методики пізнання предмету вивчення та його значимості на рівні не менше ніж нормативних державних і міжнародних стандартів. Для студентства це все, безсумнівно, підвищує престижність лекцій, їх значимість і, у результаті, сприяє оптимізації по засвоєнню майбутньої спеціальності з позицій її успішної професійної реалізації.

1. ДСТУ ISO/IEC 27000:2019 (ISO/IEC 27000:2018, IDT) Інформаційні технології. Методи захисту. Системи керування інформаційною безпекою. Огляд і словник термінів. Київ ДП «УкрНДНЦ». Наказ від 16.10.2019 № 312.
2. ISO/IEC 27001:2013 Информационные технологии — Методы обеспечения безопасности — Системы менеджмента информационной безопасности — Требования /Information technology — Security techniques — Information security management systems —Requirements/ Вторая редакция. 2013-10-01.
3. Тарасенко Ю.С. Ризик-орієнтовані процеси забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури // Ю.С.Тарасенко, Ю.В.Савченко // Системи та технології №1 (65), 2023. с.67-76
- 4.Yu.S. Tarasenko, V.Iu. Klym. Safety of critical infrastructure objects from the positions of risk effectiveness reduction. // System technologies. Pp. 158-168. Vol. 4 No. 141 (2022).

5. ДСТУ ISO 9000:2015 (ISO 9000:2015, IDT) Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Київ ДП «УкрНДНЦ», 2016. 51 с.
6. ДСТУ ISO Guide 73:2013. Керування ризиком. Словник термінів (ISO Guide 73:2009, IDT). [Чинний від 2014–07–01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 17 с.
7. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014–07–01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с.
8. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018 Risk Management – Principles and guidelines on implementation, IDT). [Чинний від 2019–01–01]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>
9. ДСТУ ISO/TR 31004:2013 Управління ризиками – Керівництво з впровадження ISO 31000 (Risk management – Guidance for the implementation of ISO 31000, IDT). [Чинний від 2019–01–01]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/56610.html?browse=tc6>
10. ДСТУ ISO/IEC 27000:2019 (ISO/IEC 27000:2018, IDT) Інформаційні технології. Методи захисту. Системи керування інформаційною безпекою. Огляд і словник термінів. Київ ДП «УкрНДНЦ». Наказ від 16.10.2019 № 312.
11. Закон України Про критичну інфраструктуру № 1882 - IX від 16.11.2021р. // Голос України. . – № 236 (14.12.2021).

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗЧИТУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ TXT ФАЙЛІВ НА БАЗІ ARDUINO NANO

М.С. Савельєв, О.М. Гулєша

Дніпровський державний технічний університет

У доповіді подано процес розробки мікропроцесорного зчитувального пристрою txt файлів на базі Arduino Nano. Запропоновано прототип пристрою, якій призначено для зчитування текстових файлів, які записано на карту пам'яті MicroSd у форматі txt та вивід інформації з цих файлів на OLED дисплей (рис. 1 – 2).

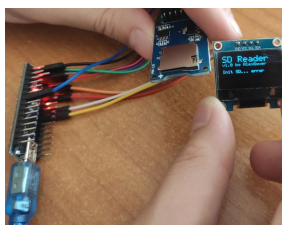


Рис. 1 Робота мікропроцесорного пристрою зчитування txt файлів на базі Arduino Nano, без карти пам'яті



Рис. 2 Зчитування txt файлу мікропроцесорним пристроєм з карти пам'яті

Роботу було поділено на дві частини – перша частина стосується аналітичного огляду електронних книжок, їх типів та принципів роботи. Вивчення принципів роботи різних типів електронних книжок дозволило зрозуміти, як вони функціонують, і який набір команд слід застосувати. Друга частина роботи була присвячена підбору відповідного універсального об'єкта мережевої структури Arduino, тобто інтеграції Arduino, зчитувального пристрою карт пам'яті MicroSd, та OLED дисплею, який виводить текстову інформацію на екран.

Вивчений матеріал дозволив розробити функціональну схему мікропроцесорного зчитувального пристрою txt файлів, яка є основою для розробки проекту. Інструментом, що встановлює зв'язок між головним пристроєм і підлеглими пристроями, виступило ПЗ Arduino IDE для ОС Windows, яке працює на базі мови високого рівня програмування C та C++. Можливості і якісна настройка ПЗ Arduino IDE забезпечило правильну і налагоджену роботу мікропроцесорного зчитувального пристрою txt файлів.

У загальному і цілому, дана система доступна з фінансової точки зору для пересічного громадянина й легко може бути реалізована на практиці. Індекс рентабельності розробленого пристрою $PI=1,70$, що більше за одиницю, а це свідчить про доцільність проекту. Практична цінність отриманих у роботі висновків та пропозицій полягає у тому, що впровадження даної розробки, дозволяє зчитувати текстові файли формату txt, та виводити інформацію з цих файлів на OLED дисплей.

Даний пристрій можна вдосконалити в майбутньому додавши більший за діагоналлю дисплей, кнопки керування пристроєм, та зчитування більшої кількості форматів текстових файлів.

АЛГОРИТМ ПРИСКОРЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТАПОЛЯЦІЙНИХ ПОЛІНОМОВ

І. А. Сафронова, А. П. Дзюба

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Незважаючи на потужні можливості сучасної обчислювальної техніки, проблема зменшення обчислювальних витрат в задачах числового аналізу складних систем залишається однією з важливих проблем. Приймаючи до уваги, що навіть одноразове вирішення багатьох задач, зокрема в механіці деформівного твердого тіла, може потребувати значного обсягу обчислювального часу, коректна реалізація відповідних ітераційних алгоритмів може виявитися досить проблематичною.

Для зменшення кількості кроків (прискорення збіжності) методів послідовних наближень, які характерні для багатьох алгоритмів вирішення відповідних нелінійних задач у різних галузях, зокрема в задачах розрахунку складних механічних систем, в поданій роботі пропонується методика імітаційного прогнозування параметрів ітераційних процесів шляхом використання екстраполяційних поліномів Лагранжа n -го порядку.

Суть підходу полягає в тому, що при заданих вихідних параметрах окремого кроку послідовних наближень проводиться n повноцінних розрахунків прямої задачі поточного ітераційного процесу, а параметри $(n+1)$ -го кроку прогножуються у вигляді поліномів Лагранжа з використанням даних цих попередніх наближень.

Це дозволяє зберегти один «зайвий» розрахунок на цьому фрагменті ітераційного процесу.

Подальша методологія підходу може мати наступні продовження:

а) Повне повторення дій попереднього кроку з використанням даних отриманого прогнозу та $(n-1)$ прямих розрахунків поточного ітераційного процесу і подальша екстраполяція параметрів наступної ітерації;

б) Використання даних попереднього прогнозу, виконання m ($m < n$) прямих розрахунків та залучення $n-(m+1)$ даних попередньої ітерації для екстраполяції значень наступного кроку.

Це надає можливість на кожному етапі послідовних наближень уникнути $k \geq 1$ повних (прямих) розрахунків досліджуваної системи.

Крім того, як показали результати системних числових експериментів, прогнозні значення параметрів обчислювального процесу виявляються навіть «кращими» значень відповідного регулярного ітераційного процесу, що, у цілому, в $1,5 \div 2$ рази дозволяє прискорити ітераційний процес.

Найбільш ефективним у співвідношенні «кількість ітерацій – кількість прямих розрахунків» виявився метод квадратичної апроксимації, як аналог відомого оптимізаційного алгоритму Пауелла. У цьому випадку ($n=2$) використовується поданий вище варіант а) алгоритму.

Методологія апробована шляхом розв'язування широкого кола задач механіки геометрично нелінійних оболонкових елементів конструкцій та оптимізації їх параметрів.

***В другій частині конференції (вересень 2024 р.) проведено Симпозіум
«Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій», присвячений 105-ій
річниці від дня народження академіка В.І. Моссаковського***

INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC

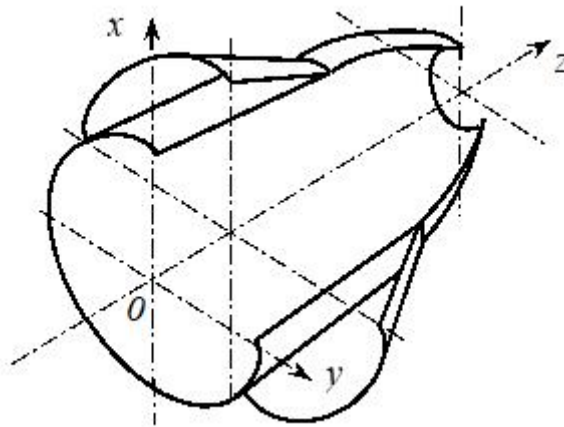
*ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE
MPTM 2024*

September 17-19, 2024
Dnipro, Ukraine

Book of Abstracts
Part 2

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ **МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2024**

Матеріали конференції



Дніпро – 2024

МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2024

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Стеблянко П.О.

Заступники голови: Дзюба А.П., Крилова Т.В., Пошивалов В.П.

ТЕМАТИКА ДОПОВІДЕЙ

3. Механіка деформівного твердого тіла, механіка рідини, газу та плазми.
4. Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті.

ЗМІСТ

<i>Симпозіум (присвячений 105-ій річниці від дня народження академіка В.І. Моссаковського)</i>	сторінки 128 - 156
<i>Секція Механіка</i>	сторінки 157 - 170
<i>Секція Іноваційні технології</i>	сторінки 171 - 199

В межах першої частини конференції проведено Симпозіуму «Механіка деформівних тіл і конструкцій», пам'яті член-кореспондента НАНУ В.С. Гудрамовича

В рамках другої частини конференції (вересень 2024 р.) проведено Симпозіум «Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій», присвячений 105-ій річниці від дня народження академіка В.І. Моссаковського

Симпозіум

**«Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій»,
присвячений 105-ій річниці від дня народження
академіка В.І. Моссаковського (19 вересня 2024)**

1(133) А.П.Дзюба ВИДАТНИЙ ВЧЕНИЙ, ЛЕГЕНДАРНИЙ РЕКТОР, БАГАТОГРАННА ОСОБИСТІСТЬ до 105 річчя від дня народження доктора фізико-математичних наук, професора Володимира Івановича Моссаковського (27.08.1919 – 13.07.2006)	130
2(130) В.П. Пошивалов ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЗА РАХУНОК ЗБУДЖЕННЯ В НИХ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІ	136
3(131) В.З. Гришак , В.В. Бабуров ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ЗАГАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ	137
4(126) В.В. Лобода, Т.В. Ходанен, І.Ю. Гергель, О.В.Комаров ПРО ЗНАХОДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ ЗОН ТРІЩИНИ МІЖ ДВОМА МАТЕРІАЛАМИ У ТІЛІ СКІНЧЕНИХ РОЗМІРІВ	139
5(97) O.P. Krukovskiy, G.I. Larionov, U.V. Zemlyana ON MATHEMATICAL MODEL CHOICE OF REBAR ANCHOR AND FIXED COMPOUND INTERACT PROCESS	140
6(57) Ю.П. Глухов МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ШАРУВАТІЙ ОСНОВІ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ	141
7(65) O.D. Petrov, Yu.A. Chernyakov, P.O. Steblyanko BENDING OF A THREE-DIMENSIONAL BEAM IN THE PRESENCE OF LARGE PLASTIC DEFORMATIONS	142
8(105) М.О. Бабешко, В.Г. Савченко АНАЛІЗ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ТЕРМОПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА РІЗНОМОДУЛЬНОСТІ МАТЕРІАЛІВ	143
9(119) O.G. Nikolaev, M. V. Skitska THERMOELASTIC PROBLEM FOR A SPACE WITH TWO INCLUSIONS AND HEAT GENERATION	144
10(88) І.О. Горошко, А.Г. Дем'яненко, Д.В.Клюшник МЕХАНІЧНІ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ ПРУЖНИХ СИСТЕМ З РУХОМИМ ІНЕРЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ, ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ, АНАЛОГІ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	145
11(112) Є.М. Ірза ТЕРМООБРОБКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ	146
12(118) O.G. Nikolaev, A. S. Krainichenko SOME PROBLEMS FOR TRANSVERSALY ISOTROPIC SPACE WITH PERIODIC CRACK SYSTEMS	147
13(120) Т.В. Ходанен, В.В. Дерев'янка ВИКОРИСТАННЯ ANSYS SMART CRACK GROWTH ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	

ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ КРАЙОВОЇ ТРІЩИНИ В ІЗОТРОПНОМУ ТІЛІ	148
14(123) K. Muravski, E. Strelnikova, D. Kriutchenko, O. Sierikova HYPERSINGULAR INTEGRAL EQUATIONS IN CRACK PROPAGATION PROBLEMS	149
15(122) N. Chondhary, K. Degtyarev, E. Strelnikova, O. Sierikva COMPUTER SIMULATION OF FREE AND FORCED VIBRATION OF COMPOUND FUEL TANKS	150
16(58) А. Ю. Глухов, Ю.П. Глухов ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ ВЗДОВЖ ШАРІВ КОМПОЗИТНОГО НЕСТИСЛИВОГО МАТЕРІАЛУ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ	151
17(128) А.В. Сохацький А.В. ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПОБЛИЗУ МЕЖІ РОЗДІЛУ СЕРЕДОВИЩ	153
18(125) Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький ВПЛИВ ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ДВУШАРОВОГО ТІЛА ПРИ СКЛАДНИХ УМОВАХ КОНТАКТУ	154
19(68) E. L. Hart, O. D. Shebanov ON STRESS CONCENTRATION NEAR A CIRCULAR HOLE IN A CYLINDRICAL SHELL IN THE PRESENCE OF ELLIPTICAL INCLUSIONS	155
20(129) О.В. Комаров ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ УСТАЛЕНОМУ РУСІ ТРІЩИНИ В ОРТОТРОПНОМУ МАТЕРІАЛІ	156

**ВИДАТНИЙ ВЧЕНИЙ, ЛЕГЕНДАРНИЙ РЕКТОР, БАГАТОГРАННА
ОСОБИСТІСТЬ**

*(до 105 річчя від дня народження доктора фізико-математичних наук,
професора*

Володимира Івановича Моссаковського)

(27.08.1919 – 13.07.2006)



Народився майбутній учений 27 серпня 1919 року в м. Мелітополь у сім'ї службовця. Після закінчення з золотою медаллю середньої школи №38 м. Дніпропетровська в 1939 році вступив до фізико-математичного факультету Дніпропетровського державного університету (ДДУ). У жовтні цього ж року його було призвано до Червоної Армії і далі, прямо зі строкової служби – на Велику Вітчизняну війну.

Пройшов 1-й і 3-й Білоруські та 1-й Український фронти. Як дешифрувальник звукової батареї розвідувального дивізіону Володимир Моссаковський, використовуючи знання з математики, за звуком ворожих пострілів визначав координати ворожих батарей, необхідних для ведення прицільного вогню по ворогу. Бойові заслуги В.І. Моссаковського відзначені орденом Червоної Зірки та багатьма медалями.



Від солдата до академіка

Повернувшись з фронту після шестирічної перерви в навчанні, він у грудні 1945 р. поновився на першому курсі ДДУ. Тут по-справжньому розкривається його блискучий талант майбутнього вченого. За 11 років В.І. Моссаковський пройшов шлях від першокурсника до доктора наук. З відзнакою закінчив фізико-математичний факультет. У 1950 році вступив до аспірантури і через 2 роки, достроково, захистив кандидатську дисертацію, а через 4 роки (1956 р.) – докторську дисертацію на тему «Деякі просторові контактні задачі теорії пружності». Одержані фундаментальні результати стали потужним підґрунтям для подальших досліджень процесів деформування пружних тіл в умовах контактної взаємодії, які згодом були реалізовані ним особисто та в роботах його числених учнів.

Широко відомими стали отримані В.І. Моссаковським результати в області математичної теорії пружності, теорії тріщин і механіки крихкого руйнування, статички й динаміки неоднорідних тонкостінних конструкцій. Ним, уперше з вичерпною повнотою, розв'язані мішані задачі теорії пружності для півпростору з круговою лінією розділення граничних умов, задача для простору з плоским круговим розрізом, ряд просторових контактних задач зі змінною областю контакту. Під безпосереднім керівництвом В.І. Моссаковського розроблено нові інтерференційно-оптичні методики досліджень, що дозволило одержати ряд вагомих експериментальних результатів з проблем контактної взаємодії твердих тіл та механіки тонкостінних конструкцій. Його дослідницькому стилю властиве добре продумане використання математичного апарату і глибоке проникнення у фізичну сутність проблеми. Він був гарячим прихильником широкого застосування експериментальних методів для обґрунтування робочих гіпотез теорії і перевірки одержаних результатів на практиці.

Маючи тонке інженерне мислення, В.І. Моссаковський плідно співпрацював з ученими та інженерами конструкторського бюро ракетно-космічної техніки «Південне». Під його керівництвом та за активною участю розроблено ряд унікальних методик розрахунку силових конструкцій.

Ураховуючи потреби у фахівцях з міцності і надійності конструкцій ракетно-космічної техніки, в 1953 році на фізико-технічному факультеті ДДУ було відкрито кафедру механіки суцільного середовища, перейменовану далі в кафедру аеромеханіки та теорії пружності, керівником якої був В.І. Моссаковський. Далі він заснував та 36 років був завідувачем (з 1953 по 1989 р.) кафедри прикладної теорії пружності (з 1992 р. це кафедра обчислювальної механіки і міцності конструкцій).

Він був організатором і науковим керівником (з 1968 по 1989 р.) створено ним Проблемної науково-дослідної лабораторії міцності і надійності конструкцій, де велися

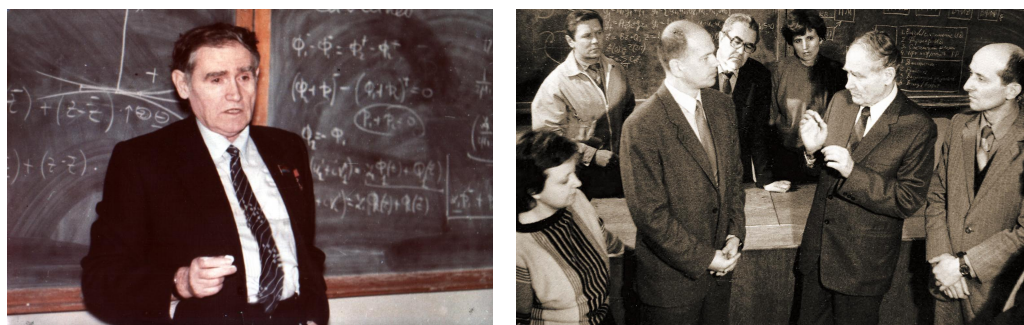
фундаментальні та прикладні дослідження задач механіки контактної взаємодії, статичної й динаміки тонкостінних конструкцій, механіки руйнування та оптимального проектування конструкцій.



Експериментальні дослідження в Проблемній НДЛ міцності і надійності конструкцій

Керовані В.І. Моссаковський колективи кафедри та лабораторії одержали вагомі наукові результати, багато з яких мали як фундаментальне наукове значення, так і широке впровадження в інженерну практику. У результаті науково-педагогічної та організаторської діяльності В.І. Моссаковського в Дніпропетровську склалася відома наукова школа в галузі механіки деформівного твердого тіла, яка стала одним і з провідних підрозділів цієї галузі, а вихованці створеної ним кафедри і до сьогодні продовжують справу вченого в науково-дослідній та педагогічній роботі Дніпропетровського національного університету та у провідних конструкторських бюро ракетно-космічної та авіаційної техніки, вищих навчальних закладах і науково-дослідних інститутах НАН України.

Він – фундатор і керівник відомої в Україні і далеко за її межами Дніпропетровської наукової школи механіки, автор біля 300 наукових праць, з яких 7 монографій, керівник 12 докторських та 47 кандидатських дисертацій.



Авторитет наукового семінару В.І. Моссаковського був безсумнівним

Визнанням наукового авторитету професора В.І. Моссаковського стало його обрання в 1967 році членом-кореспондентом, а в 1972 році – дійсним членом АН УРСР по відділенню «Механіка, математика і кібернетика».

Професор В.І. Моссаковський був ініціатором і головою оргкомітетів великої кількості авторитетних наукових конференцій і симпозіумів, виступав з доповідями на міжнародних конгресах з теоретичної і прикладної механіки (США, Нідерланди, Канада, Данія), Всесоюзних з'їздах з теоретичної і прикладної механіки, наукових конференціях і симпозіумах. Він був членом Національного комітету з теоретичної і прикладної механіки України, керував Науковою Радою НАН України Придніпровського регіону з проблеми «Кібернетика», очолював роботу редколегій відомих наукових видань: міжвузівського журналу «Гідроаеромеханіка і теорія пружності», «Динаміка і міцність важких машин», Вісника Дніпропетровського університету, серія «Механіка», фахових збірників наукових праць «Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій», «Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла», серії збірників наукових праць Інституту кібернетики НАН України та ін.

Важко переоцінити внесок професора В.І. Моссаковського в розвиток Дніпропетровського державного університету, ректором якого він був протягом 22 років (1964-1986 рр.).



Справа життя. Будівництво корпусів та університетського містечка.



Повести за собою – одна з характерних рис В.І Моссаковського



Власним прикладом надихати на трудові звитяги

За цей час були побудовані та введені в експлуатацію головний навчально-адміністративний корпус №1, корпуси № 8, 9, 10, 11, 12, спецафедра (корпус №13), стрілецький тир, житловий будинок, експозиційна оранжерея ботанічного саду, перша черга експериментально-господарського блоку, спортивний комплекс із 4 спортивними залами і 2 плавальними басейнами, культурно-побутовий корпус, спортивно-оздоровчий

табір у с. Кочережки Павлоградського району, стаціонарне хокейне поле, два гуртожитки (№4 і №5) у сукупності більше, ніж на 1,5 тис. місць. Результатами цієї роботи стало поліпшення умов праці і побуту викладачів і студентів університету. Вперше за багато років університет зміг відмовитись від оренди приміщень інших організацій, перейти на однозмінні заняття. Істотно зріс якісний рівень науково-викладацького складу, , організовано нові факультети, кафедри і лабораторії, створено потужний обчислювальний центр зміцнено зв'язки з навчальними закладами і промисловими підприємствами.

За час перебування В.І. Моссаковського на посаді ректора Дніпропетровський університет став одним із найбільш авторитетних закладів держави та увійшов до 25 провідних вузів СРСР.

В.І. Моссаковський був надзвичайно багатогранною творчою особистістю. Талановитий учений-механік він, водночас, був носієм культури в найвищому розумінні цього слова. Володів багатьма іноземними мовами, глибоко знав історію, був закоханий у літературу, добре грав у шахи, любив спорт, його приваблювали всі грані життя.



Грані життя



Нагорода від Президента

Для своїх учнів – він, насамперед, був доброзичливим і мудрим наставником. Широка ерудиція, талант дослідника й організатора, висока наукова принциповість і вимогливість, тонке відчуття нового і перспективного у поєднанні з умінням створити в колективі обстановку наукової творчості, були притаманні йому протягом усіх років діяльності. В.І. Моссаковський – достойний взірець у науковому пошуку, педагогічній роботі, ставленні до праці.



В.І. Моссаковський в день 80-річчя в колективі рідної кафедри

Видатна науково-педагогічна і громадська діяльність академіка В.І. Моссаковського відзначені званням Героя Соціалістичної Праці, Золотою медаллю «Серп і Молот», двома орденами Леніна, двома орденами Трудового Червоного Прапора, орденом князя Ярослава Мудрого V ступеня, «Знак Пошани», орденами Червоної Зірки, За Мужність, орденом Вітчизняної війни II ступеня, медалями «За бойові заслуги», «За взяття Берліна», «Маршал Г.К. Жуков», Почесними грамотами Верховної Ради України (неодноразово) та багатьма іншими високими відзнаками. В. І. Моссаковський – Лауреат Державної премії у галузі науки і техніки та Премії Ради Міністрів. Ім'я В.І. Моссаковського занесено до Книги Трудової Слави Дніпропетровщини, Він Почесний громадянин м. Дніпропетровська, Людина 2000 року за оцінкою Міжнародного Бібліографічного Інституту (Кембрідж, Велика Британія).

Світла пам'ять про видатного вченого, Велику Людину в усіх розуміннях цього слова, назавжди залишиться в наших серцях.

Матеріали про наукову діяльність академіка. НАН України, професора В.І. Моссаковського увійшли до таких видань:

- В.І. Моссаковський – вчений, ректор, особистість. / Під ред. М.В. Полякова, В.С. Гудрамовича, А.П. Дзюби. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2009. – 664 с.
- Професори Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро: Ліра, 2018. С. 220–221.
- Професори Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро: Ліра, 2008. С. 320–322.
- Архів ДНУ – Ф.1, об. 1, спр. 2430, 2431, 2432.
- Актуальні проблеми суцільного середовища і міцності конструкцій / Тези доп. МНТК пам'яті академіка НАНУ В.І. Моссаковського.– Д., 2007. С.3–6.

***Матеріали доповіді проф. А.П. Дзюби на
Симпозіумі пам'яті В.І. Моссаковського МНК
«Математичні проблеми технічної механіки -2024»***

ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЗА РАХУНОК ЗБУДЖЕННЯ В НИХ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ

В. П. Пошивалов

Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ

Об'єктом дослідження були зразки алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6М, що деформується, піддані попередній енергетичній обробці.

Зразки попередньо піддавалися повзучості приблизно до половини часу руйнування, а потім проводилася проміжна енергетична обробка, яка включала дію стискаючих і розтягуючих навантажень у тепловому полі та ударних ультразвукових коливань.

Загальна схема обробки зразків така: електростимульоване нагрівання зразків до температури $T = 160^{\circ}\text{C}$ за рахунок проходження через них електричного струму; одночасне розтягування зразків у режимі повзучості з наступною витримкою приблизно в половину часу руйнування; навантаження на стиск зразків при температурі $T = 300^{\circ}\text{C}$; відпал зразка при $T = 320^{\circ}\text{C}$.

Випробування на стиск проводили з навантаженням $P = 0,5 \cdot \text{МН}$ на зразках, які перебували в нагрітому стані ($T = 300^{\circ}\text{C}$). При цьому в середньому товщина зразка зменшилася на 35%, ширина збільшилася на 57%, довжина – на 4%.

Вплив ударних ультразвукових коливань здійснювали за допомогою генератора ударного ультразвуку шляхом сканування ударником по поверхні зразка з частотою 20 кГц. При цьому оптимальна амплітуда коливань випромінювача становила 19,8 мкм. Ударну ультразвукову обробку проводили в пружній зоні деформації при одночасному розтягуванні.

Випробування на повзучість проводили в прискореному режимі: витривалість під навантаженням $P = 2100 \text{ Н}$ в умовах одночасного розтягування при температурі $T = 160^{\circ}\text{C}$. Під час випробувань на повзучість зразків, що піддалися енергообробці, вносили поправку на величину навантаження з урахуванням зміни поперечного перерізу зразка.

Вплив енергетичних потоків на матеріал оцінювали за зміною характеристик короткочасної міцності (границя міцності та границя текучості), довготривалої міцності (час до руйнування при повзучості), питомої роботи руйнування зразка, яка становить визначається площею під кривою деформації, а також мікроструктурними змінами.

Проміжну пластичну деформацію під час випробувань на повзучість забезпечували за двома схемами.

За першою схемою зразки, які витримали приблизно половину часу до руйнування, після розвантаження та охолодження піддавали високотемпературному стискаючому навантаженню, а потім проводили ударну ультразвукову обробку. Після цього зразки повертали в режим повзучості до руйнування.

За другою схемою після високотемпературного стискаючого навантаження проводився відпал зразків при температурі $T = 320^{\circ}\text{C}$ протягом 2 годин з подальшим впливом ударних високочастотних коливань.

Запропонований спосіб енергетичної обробки сплаву АМг6М в умовах повзучості значно збільшує час до руйнування.

Встановлено, що енергетична обробка сплаву АМг6М за виявленою схемою дозволяє наблизити його за міцнісними властивостями до сплаву 01570, легованого скандієм, який належить до тієї ж системи Al-Mg, але є значно дорожчим.

ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ЗАГАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ

Грищак В.З.¹, Бабуров В.В.²

¹*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

²*Конструкторське бюро «Південне ім. М.К. Янгеля»*

В конструкціях сучасного машинобудування, ракетно-космічної й авіаційної техніки та інших галузях народного господарства широке застосування знаходять конструкції складної геометричної конфігурації, зокрема спеціального призначення, які суттєво впливають на несучу здатність досліджуваної системи в цілому.

Аналітичні, у тому числі наближені, методи дослідження напружено-деформованого стану і стійкості силових конструкцій складної конфігурації в реальних умовах експлуатації пов'язані із значними труднощами чисельного аналізу математичних моделей, яким відповідає складна система диференціальних рівнянь в частинних похідних, у загальному випадку із змінними коефіцієнтами, при розв'язанні якої може спостерігатися нестійкість чисельного процесу, що не уможливорює у ряді випадків їх практичне застосування. З іншого боку, як показує практика останніх років, застосування асимптотичних, у тому числі гібридних підходів, дають можливість здобути ефективні розв'язки на стадії проектування реальних систем з подальшим уточненням прогнозованих руйнівних навантажень із застосуванням чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів та його модифікацій.

Конкурентні вироби нової техніки у зв'язку з сучасними представленнями розвитку конкретної галузі промисловості і вирішуваних завдань вимагають вдосконалення процесу проектування конструкцій на базі сучасного математичного забезпечення з врахуванням досвіду використання аналітичних методів дослідження, вітчизняних та зарубіжних систем автоматизованого проектування (САПР або CAD) і систем автоматизації інженерних розрахунків і аналізу (CAE), що дозволяють будувати моделі процесу деформації, вичерпання несучої здатності, зокрема загальної стійкості оболонкових систем, і візуалізацією руйнування конструкцій складної конфігурації при простому і комбінованому зовнішньому навантаженні.

Дана робота присвячена застосуванню методів аналізу напружено-деформованого стану і несучої здатності силових елементів та конструкцій спеціального призначення у реальних експлуатаційних умовах.

Запропонована методика комп'ютерної моделі на базі методу скінченних елементів оцінки несучої здатності та прогнозування руйнівного навантаження складених конструкцій, зокрема гладких паливних баків ракет-носіїв (РН) на прикладі єдиного паливного відсіку з порівняльним аналізом розрахункових та експериментальних даних, який показав задовільну збіжність результатів для розрахункової моделі з використанням фактичних механічних властивостей матеріалу і врахуванням історії навантаження.

Знайшов подальший розвиток метод оцінки напружено-деформованого стану та міцності трубопроводів у системі РН в умовах, наближених до експлуатаційних, зокрема з урахуванням нерегламентованого силового впливу та залишкових деформацій. Запропонована математична модель трубопроводу і надано аналіз розрахунків напружено-деформованого стану з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності матеріалу (тип аналізу Nonlinear Static). Надано аналіз нештатного силового впливу на міцність конструкції і можливість її подальшої експлуатації. При

проведенні розрахунків використовувався метод скінченних елементів і оснований на ньому програмний комплекс MSC.NASTRAN.

Під час відпрацювання виробів нової техніки виникають задачі, пов'язані з необхідністю доробки існуючої штатної конструкції з метою вирішення незапланованих конструктивних завдань, які виникають при експлуатації. Надається розв'язок даної задачі на прикладі доробки конструкції для усунення зазорів в шліцьовому з'єднанні. З метою виключення зазорів, які виникають при виготовленні за рахунок допусків, запропоновано виконання повздовжнього різь валу вздовж всієї довжини шліців та встановлення розпірної втулки з попереднім натягом з проведенням розрахунків міцності конструкції.

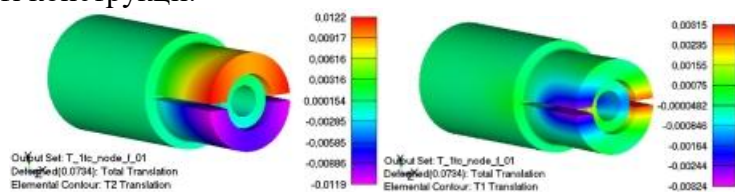


Рис. 1 – Розподіл переміщень валу при дії осевого зусилля

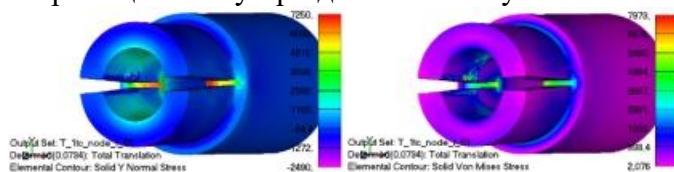


Рис. 2– НДС валу при дії осевого зусилля

Проведено порівняння отриманих експериментальних та розрахункових даних з використанням попереднього аналітичного аналізу з подальшим застосуванням чисельного алгоритму на базі методу скінченних елементів.

Надано аналітико-чисельний алгоритм аналізу впливу знаку Гауссової кривини серединної поверхні складеної оболонкової системи РН на локальне і загальне випинання при дії декількох параметрів біфуркації. Особливістю даної роботи є формулювання постановки і розв'язок задачі про вплив негативного знаку Гауссової кривини на одному з відсіків оболонкової складеної конструкції на її біфуркаційний стан. Розв'язок базується на застосуванні методу скінченних різниць для основних рівнянь стійкості кожного відсіку у випадку, коли один з них може бути з негативною кривиною меридіана, з урахуванням дискретності розміщення проміжних ребер та жорсткості їх з площини початкової кривини. Отриманий розв'язок дозволяє здійснити візуалізацію форми втрати стійкості для різних комбінацій зовнішнього навантаження та визначити раціональні з точки зору рівності стійкості по відношенню до локальних і загальних форм біфуркації геометричні та жорсткісні параметри досліджуваної системи. На основі запропонованого підходу надається аналіз стійкості складеної оболонкової конструкції з меридіаном серединної поверхні різної форми, що знаходиться під одночасною дією нерівномірно розподіленого зовнішнього тиску і осевого розтягування - стискання. Досліджений у попередніх роботах вид конструкцій типу 'бочка-оживало' узагальнений на випадок наявності від'ємного знаку Гауссової кривизни на одному з її відсіків.

Література

1. Gristchak V.Z., Hryshchak D.V., Dyachenko N.N., Baburov V.V. The Influence of the Gaussian Curvature Sign of the Compound Shell Structure's Middle Surface on Local and Overall Buckling under Combined Loading/ Космічна наука і технологія, 2022, т21, №4.
2. Бабуров В.В., Гусев В.В., Клименко Д. В. Аналіз напружено-деформованого стану та міцності трубопроводу з врахуванням нерегламентованого силового впливу та залишкових деформацій. *Проблеми*

обчислювальної механіки і міцності конструкцій,
м. Дніпро, 2023, вип.36.

3. Клименко Д.В., Бабуров В.В., Дьяченко Т.П. Прогнозування руйнівного навантаження гладких паливних баків ракет-носіїв на прикладі єдиного паливного відсіку. *Сучасні проблеми термомеханіки – 2021* : зб. тез доп. міжнар. наук. конф., м. Львів, 15-17 вересня 2021 р., Львів, 2021. С 207–209.

ПРО ЗНАХОДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ ЗОН ТРІЩИНИ МІЖ ДВОМА МАТЕРІАЛАМИ У ТІЛІ СКІНЧЕННИХ РОЗМІРІВ

Лобода В.В., Ходанен Т.В., Гергель І.Ю., Комаров О.В.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Однією з основоположних робіт стосовно дослідження тріщини між двома матеріалами була робота В.І. Моссаковського і М.Т. Рибки [1]. В ній була отримана осцилююча коренева особливість біля краю такої тріщини, тобто фактично передбачено існування зон контакту берегів в околі вершин тріщини. Пізніше це передбачення було підтверджено в роботі М. Comninou [2] та її послідовників, де були знайдені довжини зони контакту берегів міжфазних тріщин у необмежених біматеріальних тілах з тріщинами.

В даній роботі пропонується методика знаходження контактних зон тріщин між двома матеріалами у тілах скінченних розмірів. Для прикладу розглядається міжфазна тріщина вздовж жорстко закріпленої границі ізотропного тіла прямокутного поперечного перерізу в умовах плоскої деформації. Вважається, що біля правої вершини тріщини виникає зона гладкого контакту її берегів.

Використано метод скінченних елементів. За його допомогою знайдено довжини зон контакту для різних видів навантаження. Ці довжини визначаються в першу чергу інтенсивністю зсувного напруження, що задається на границях області. В якості критеріїв для знаходження довжин зон контакту використовувались значення вузлових реакцій та коефіцієнта інтенсивності напружень у лівій частині зони контакту берегів тріщини. Відмінність результатів, що одержані за допомогою цих критеріїв, є дуже незначною. Для різних довжин зон контакту визначено також коефіцієнт інтенсивності напружень та J -інтеграл.

Побудовано також аналітичний розв'язок для тіла, розміри якого значно більші довжини тріщини і його можна апроксимувати півпростором. При порівнянні результатів отриманих чисельним та аналітичним способами, похибка не перевищила 2%. Така хороша узгодженість між результатами стала можливою завдяки згущенню сітки при підході до вершин тріщини та використанню сингулярних елементів.

1. Моссаковский В. И., Рыбка М. Т. Обобщение критерия Гриффитса-Снеддона на случай неоднородного тела. Прикл. математика и механика. 1964. Т. 28, № 6. С. 1061–1069.

2. Comninou M. The interface crack. Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1977. Vol. 44. p. 631–636.

ON MATHEMATICAL MODEL CHOICE OF REBAR ANCHOR AND FIXED COMPOUND INTERACT PROCESS

O.P. Krukovskiy, G.I. Larionov, U.V. Zemlyana

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

Anchoring of underground structures is becoming an increasingly common and modern type of support. This is due to the low cost and low metal consumption. Modern methods for calculating anchoring systems are based on the widespread use of modelling techniques. Mathematical modelling (MM) stands out among them due to its convenience and accessibility, thanks to the widespread use of computer systems. However, the main component of MM is the choice of a mathematical model. Numerical methods based on the finite element method (FEM) are the most widely used. The well-developed interface of modern packages of FEM-based methods contributes to their widespread use. However, the analysis of the obtained numerical data has its own peculiarities. For example, graphical representation of the dependence of the stress-strain state parameters in the vicinity of the workings on the structural parameters of the support is limited to two- and three-dimensional images. The visibility of such images allows them to be used for recommendations and conclusions regarding support designs. Since the set of such parameters can be significant, the procedure for analyzing the importance of their influence on the stress-strain state in the vicinity of the supported face is not simple. What if we could find a simpler MM that would allow us to obtain solutions not by numerical procedures, but in the form of analytical formulas.

It turned out that the generalised problem of M.E. Zhukovsky not only corresponds to the processes and conditions of operation of a metal-polymer anchor fixed in rock, but also allows obtaining an analytical connection between the parameters of the stressed deformed state and its design parameters. The assumption underlying this problem and having an analytical solution is that the interaction of a metal-polymer anchor with rock is similar to the interaction of an anchor through an intermediate sleeve with the environment. Modification of this model to meet the needs of mathematical modelling and calculation of the support of a mine workings with metal-polymer anchors allowed it to be successfully used for practical purposes.

However, a detailed study of the model revealed the need to take into account the peculiarities of interaction at the contacts in the system "anchor rebar - fixing compound - rock". Until now, tensile displacements at these contacts have been taken as proportionality coefficients in the expressions of displacements from forces acting on the fixing mixture both from helical protrusions on the anchor rebar and at the contact with the rock. However, an in-depth analysis of the interaction of the fixing mixture with the anchor rebar made it possible to take into account a more complex mechanism for their determination. The reasons for this decision were based on the analysis of the displacements that the anchor rebar received when it was pulled out of the rock mass. According to the experiments, the displacements were much greater than the elastic displacements.

Therefore, taking into account the insignificant thickness of the fixing compound layer, it is proposed to take into account not only the elastic deformation process due to the action of tensile forces and shear forces, but also to take into account viscoelastic processes occurring during the deformation of the high molecular weight material of the fixing compound to determine the contact interaction coefficients.

Comparison of the results of the distribution of interaction forces in the system "anchor rebar - fixing compound - rock" obtained by the proposed model and those

obtained by the FEM method showed a slight difference in the results, which allowed us to conclude that the approach was correct.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ШАРУВАТІЙ ОСНОВІ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Ю.П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Дана робота присвячена вивченню впливу захисного покриття, початкових напружень, механічних характеристик матеріалів, параметрів руху поверхневого навантаження на напружено-деформований стан пружної основи. Актуальність результатів дослідження пов'язана з можливістю їх використання при створенні якісно нових матеріалів, конструкцій і будівельних споруд. Розглядається попередньо напружений нестисливий півпростір з неоднорідністю у вигляді тонкого поверхневого шару. Зосереджена сила рухається по вільній поверхні захисного шару з постійною швидкістю під певним кутом до поверхні півпростору. Шар моделюється зосередженими масами. Розглядається два варіанти контакту між шаром і основою: жорсткий і нежорсткий. Передбачається, що картина деформацій інваріантна відносно часу в системі координат, що рухається разом з навантаженням. Також передбачається, що напруження, що виникає за рахунок дії навантаження, значно менше за початкові напруження. Вказане припущення дозволяє застосовувати лінеаризовану теорію пружності [1] для опису додаткового напруженого стану, викликаного дією навантаження.

Розв'язок задачі отриманий із застосуванням методу інтегральних перетворень Фур'є. Аналітичні результати приведені в загальному вигляді для матеріалів з довільним пружним потенціалом, для випадків нерівних і рівних коренів характеристичних рівнянь, для різних умов сполучення елементів шаруватого середовища і для будь-якої швидкості руху навантаження. Для числового аналізу розглядався матеріал з потенціалом Бартенєва-Хазановича. Розрахунки були проведені в рамках теорії скінченних початкових деформацій. Досліджено вплив рухомого навантаження, початкових напружень механічних параметрів елементів шаруватої основи на основні характеристики її напружено-деформованого стану. Аналіз отриманих числових результатів дозволяє зробити наступні висновки.

Значення параметрів, що характеризують напружено-деформований стан основи, визначаються координатами точки, що досліджується, початковими напруженнями, швидкістю навантаження, механічними параметрами шаруватого середовища та умовами контакту елементів шаруватого середовища.

Для докритичних швидкостей навантаження графіки величин, що характеризують напружено-деформований стан, симетричні по відношенню до точки прикладання навантаження.

Найбільше початкові напруження впливають на напружено-деформований стан основи в зоні прикладання поверхневого навантаження.

Існують області півпростору, в яких значення напружень і швидкостей переміщень мало залежать від початкових деформацій.

При заданих початкових напруженнях швидкість зростання значень величин, що досліджується, при стискуванні більше, ніж при розтягуванні.

Загасання на відстані від точки прикладання навантаження відбувається повільніше при стискуванні, ніж при розтягуванні.

Зі збільшенням швидкості руху навантаження напруження та швидкості переміщень точок півпростору зменшуються. При зміні швидкості поверхневого навантаження в дозвуковій області характер впливу початкових напружень майже не змінюється.

Для більш жорсткого шару вплив швидкості поверхневого навантаження і початкових напружень зменшується.

Умови контакту між захисним шаром і півпростором мають суттєве значення для більш жорсткого шару по відношенню до основи. Значення величин, що характеризують напружено деформований стан, у відповідних точках основи при нежорсткому контакті більше, ніж при жорсткому.

Для надзвукової швидкості навантаження епюри величин, що досліджуються, асиметричні по відношенню до точки прикладання навантаження. При цьому пряма хвиля загасає набагато швидше, ніж зворотна, але не зникає повністю через наявність поверхневого шару.

Значення напружень і швидкостей переміщень в півпросторі суттєво залежать від початкових напружень в півпросторі. Конкретний тип таких залежностей визначається положенням точки шаруватого середовища щодо точки прикладання навантаження.

Так само, як і в випадку дозвукової швидкості навантаження існують області півпростору, в яких значення напружень і швидкостей переміщень не залежать від початкових деформацій.

1. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями / А. Н. Гузь. –К.: А.С.К., 2004. –672 с.

BENDING OF A THREE-DIMENSIONAL BEAM IN THE PRESENCE OF LARGE PLASTIC DEFORMATIONS

O.D. Petrov¹, Yu.A. Chernyakov¹, P.O. Steblyanko²

¹Dnipro National University named after O. Honchar, Ukraine

²S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Ukraine

The report examines the local bending of a three-dimensional beam of rectangular section in the presence of large plastic deformations. The calculation algorithm of the three-dimensional non-stationary problem for a functionally heterogeneous material consisted of the following three steps. On the first of them, the corresponding linear problem (L) is solved and the area of the body where the deformation intensity is greater than the conditional limit (area N) is determined. Note that engineering analysis programs can also be used for this. In the second step, the problem is solved in a geometrically nonlinear formulation in the region N of the body. The third step is the refinement of the domain N and the solution itself.

АНАЛІЗ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ТЕРМОПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА РІЗНОМОДУЛЬНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

М.О. Бабешко, В.Г. Савченко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ

e-mail: bab41@ukr.net e-mail: savchenko_vitalij@ukr.net

Розроблено методики розв'язання задач термопластичності для шаруватих просторових тіл та оболонок обертання в процесах осесиметричного неізотермічного навантаження з урахуванням залежності властивостей матеріалів від виду напруженого стану та різномодульності. Розглядаються тіла та оболонки, шари яких виготовлено з ізотропних та ортотропних матеріалів. Припускається, що ізотропні матеріали деформуються як в межах, так і за межами пружності, а ортотропні – в межах пружності. Для опису ізотропних матеріалів використовуються визначальні рівняння теорії термопластичного деформування вздовж траєкторій малої кривизни [1], що містять дві нелінійні залежності, одна з яких здійснює зв'язок між першими інваріантами тензорів напружень і деформацій та температурою, а інша – між другими інваріантами відповідних девіаторів та температурою. Нелінійні залежності конкретизуються на основі експериментів на трубчастих зразках: на розтяг, стиск та кручення при кількох різних значеннях температури. За параметр виду напруженого стану прийнято кут подібності девіаторів. Для опису деформування анізотропних матеріалів використовуються два варіанти нелінійних рівнянь різномодульної теорії пружності [2,3]. Визначальні рівняння лінеаризуємо по методу додаткових деформацій і записуємо у вигляді закону Гука для ортотропного тіла з додатковими членами, коефіцієнти і додаткові члени яких визначаємо за різними формулами для ізотропних і ортотропних матеріалів. Додаткові члени для ізотропних елементів тіл містять пластичні деформації, а для ортотропних – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона при розтязі та стиску. Процес навантаження розділяємо на ряд етапів. На кожному етапі формуємо системи розв'язувальних рівнянь для тіл та оболонок, використовуючи визначальні рівняння в загальній формі, рівняння рівноваги та співвідношення Коші. Для розв'язання просторової задачі використовуємо рівняння Лагранжа та метод скінченних елементів і одержуємо розв'язувальну систему алгебраїчних рівнянь. Для розв'язання задачі теорії оболонок використовуємо гіпотези Кірхгофа – Лява для пакету шарів і одержуємо розв'язувальну систему звичайних диференціальних рівнянь.

Задачу термопластичності розв'язуємо поетапно, знаходячи розв'язок на кожному етапі методом послідовних наближень. При розв'язанні систем алгебраїчних рівнянь використовується метод Гауса. При розв'язанні систем диференціальних рівнянь використовується метод Рунге - Кутта з дискретною ортогоналізацією та нормалізацією.

На конкретних прикладах проаналізовано вплив від врахування різномодульності та залежності властивостей матеріалу від виду напруженого стану.

1. Shevchenko, Yu.N., Terekhov, R.G., Tormakhov, N.N.: Constitutive Equations for Describing the Elastoplastic Deformation of Elements of a Body along Small-Curvature Paths in View of the Stress Mode //Int. Appl. Mech.-2006. - **42**, N4. - P. 421 – 430.

2. Золочевский А.А. К теории цилиндрических оболочек, выполненных из анизотропных разномодульных материалов //Прикл. механика.–1986.–22, №3.–С.37– 43.

3. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression //AIAA J. – 1977. – **15**, N1. – P.16 – 23.

THERMOELASTIC PROBLEM FOR A SPACE WITH TWO INCLUSIONS AND HEAT GENERATION

O. G. Nikolaev, M. V. Skitska

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine

Using the example of solving a stationary axisymmetric thermoelastic problem for a space with two spherical inclusions that generate heat, a highly efficient method of researching similar problems for multi-component mechanical systems with heat generation has been developed. The proposed approach is based on the further development of the generalized Fourier method [1] for the considered class of problems. Unlike work [2], where the authors use a different method that allows solving similar problems in individual cases of inclusion materials (thermal inclusions) and at a constant density of heat sources, the method of this report does not have similar limitations. The method is strictly justified. As an additional important fact necessary for substantiation, for the first time an estimate from below of the modulus of the multi-parameter determinant of the problem of conjugation of the two-phase system space - inclusion was obtained, i.e., in fact, for the first time, the existence of a solution of such a problem by the usual Fourier method was strictly substantiated. The effectiveness of the method lies in the fact that the original problem is reduced to an infinite system of linear algebraic equations with the Fredholm operator in a certain Hilbert space. Numerical experiment showed that even for the relative distance between inclusions equals to 0.2 with the reduction parameter $n_{\max}=10$ (the size of the reduced system equals to 88×88), the accuracy of stress calculation is 3-6 correct significant digits after the point. Calculations were performed for the following phase materials: matrix – steel, inclusions – brass and aluminum, all thermomechanical constants of which are different. Densities of heat sources were considered constant, proportional to coefficients of thermal conductivity. The results of calculations are illustrated with a large number of graphical information. The general conclusion of the computer experiment is as follows. The nature of stress distribution

$\sigma_r^{(j)}, \sigma_\theta^{(j)}$ on spherical surfaces concentric with the surfaces of the corresponding inclusions (but not their numerical values) depends little on the relative sizes of the inclusions. All stresses are compressive, and the maximum stress values $\sigma_r^{(j)}$ in terms of absolute value are reached on the axis of the problem in the region near the adjacent inclusion, as well as stresses $\sigma_\theta^{(j)}$ – in the equatorial zone of the surfaces. The latter stresses have a characteristic jump on the surface of the corresponding inclusion. At almost all angles θ , the absolute values of the stresses increase as the radius of the corresponding sphere decreases.

The proposed method allows the development of multi-component bodies of other geometries.

1. Nikolaev A. G., Procenko V. S. Generalized Fourier method in spatial problems of the theory of elasticity. Monograph. Kharkov, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute, 2011. 344 p. ISBN: [978-966-662-247-4](#) (In Russian)

2. Kit H. S., Chernyak M. S. Stress state of a body with heat-generating spherical inclusions// J. Math. Sci. – 2012. – 187, No. 5. – P. 635–646. – <https://doi.org/10.1007/s10958-012-1089-4>

МЕХАНІЧНІ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ ПРУЖНИХ СИСТЕМ З РУХОМИМ ІНЕРЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ, ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ, АНАЛОГІЇ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

І.О. Горошко, А.Г. Дем'яненко, Д.В.Клюшник

Київський Національний Університет ім Тараса.Шевченка

Відомо, що метод Фур'є належить до методів математичної фізики, які дозволяють отримати розв'язки певного класу диференціальних рівнянь у частинних похідних. Лише у порівняно простих випадках маємо можливість побудувати явні розв'язки рівнянь у частинних похідних як суми часткових розв'язків у вигляді добутку відокремлених функцій. До таких рівнянь належать рівняння коливань струни, мембрани, балки та деякі інші. Пряме застосування методу до задач динаміки пружних систем з рухомим інерційним навантаженням у загальному випадку не є можливим. У зв'язку з цим зроблені спроби застосування цього методу шляхом його модифікації та узагальнення. Однією з перших відомих публікацій з цього приводу була праця Н. Steuding [1], в якій показано, що загальний розв'язок диференціального рівняння у частинних похідних, яке описує пружні коливання об'єкта за дії рухомого інерційного навантаження, являє лінійну комбінацію часткових розв'язків, які містять як симетричні, так і антисиметричні, зсунуті по фазі на прямий кут, форми коливань. Причому антисиметричні форми коливань обумовлені наявністю змішаної похідної непарної за часом, тобто силами інерції Коріоліса рухомого навантаження, і зв'язані через них з симетричними формами. Симетричні ж форми коливань при нерухомому навантаженні являють собою власні форми коливань навантаженої системи. Власне робота [1] започаткувала метод двохвильового подання коливань пружних систем за дії рухомого інерційного навантаження, фізична інтерпретація якого вперше була наведена О. О. Горошко [2]. При застосуванні до дослідження таких систем методу двохвильового подання коливань, який дозволяє у деяких випадках отримати точні розв'язки задач, загальний розв'язок диференціального рівняння подається у вигляді суми двох рядів, один з яких являє собою класичну частину розв'язку, а другий ту частину, яка обумовлена наявністю змішаної непарної за часом похідної а, саме, інерційністю рухомого навантаження і не виявляється при традиційному застосуванні прямих методів математичної фізики. Форми першої групи названі власними формами, а форми другої групи – супровідними формами коливань пружної системи. Супровідні коливання обумовлені і нетривіальні лише при наявності рухомого інерційного навантаження. В роботі розглянуто головні особливості механічних та математичних моделей задач динаміки пружних об'єктів за дії рухомого інерційного навантаження. Наведені деякі аналогії з задачами статки. Як приклад, застосовуючи метод двохвильового подання, досліджено коливання і стійкість пружного елемента за дії розподіленого рухомого потоку інерційного навантаження та виявлена нова якість руху пружного і гнучкого натягнутого по осі елемента, яка не виявляється прямими методами математичної фізики, а саме наявність другої критичної швидкості руху інерційного навантаження. Використовуючи метод двохвильового подання руху розглянуто коливання та стійкість підсилених стиснутих прямокутних пластинок та циліндричних оболонок за дії рухомого інерційного навантаження.

Список використаних джерел.

1. Steuding H. Die Schwingung von Trager bei bewegten Lasten / H. Standing // Jng.Acch. - 1934.- P.275-305
2. Горошко О. О. Двохвильові процеси в механічних системах/ О.О.Горошко, А.Г.Дем'яненко, С.П.Киба. - К.: Либідь, 1991. - 188 с.

ТЕРМООБРОБКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

Є.М. Ірза

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача
НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б; Evgen_Irza@ukr.net*

Запропоновано методику розрахунку термонапруженого стану структурно неоднорідних в'язкопружних тіл обертання при термообробці. Розроблено числовий алгоритм розв'язання відповідних задач на основі методу зважених залишків в поєднанні з методом скінченних елементів.

Вважаємо, що при розглядуваних теплових навантаженнях напружений стан тіла не впливає на його температуру, тобто задачу про визначення напружено-деформованого стану в тілі формулюємо в квазістатичній постановці (в переміщеннях). Неоднорідна структура матеріалу тіла відображається фізико-механічними характеристиками, які є залежними від просторової координати і температури.

При цьому температурне поле в тілі описується рівнянням теплопровідності [1]

$$-\left(k^{-}t\right)+Q-\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau}=0 \text { на } \Omega \quad (1)$$

за початкової і крайових умов.

Термомеханічну поведінку розглядуваних тіл описуємо на основі моделі термов'язкопружного тіла (модель Максвелла) [1].

$$\{\sigma\}=[D](\{\varepsilon\}-\{\varepsilon_t\})-\int_{\tau_0}^{\tau} R(\tau, v)[D_0]\{\varepsilon\} dv+R_0(\tau)[D_0](\{\sigma^{ost}\}-2 G\{\varepsilon^{ost}\}) . \quad (2)$$

Побудову розв'язків сформульованого класу задач базуємо на методі зважених залишків в поєднанні з методом скінченних елементів [2]. З використанням згаданих методів система вихідних співвідношень зводиться до системи нелінійних алгебричних рівнянь:

$$([C_i]+ \theta \Delta \tau [K_i])\{T\}_{i+1} = ([C_i]-(1-\theta) \Delta \tau [K_i])\{T\}_i + \{f_i\}_i ; \quad (3)$$

$$[K]-\frac{\Delta \tau}{2}[F_1(\tau, \tau)]\{U(\tau)\}=\{F_0\}+ \\ + \Delta \tau \frac{1}{2}[F_1(\tau, 0)]\{U(0)\}+\sum_{i=1}^{n-1}[F_1(\tau, \tau_i)]\{U(\tau_i)\} . \quad (4)$$

Тут $[C_i]$, $[K_i]$, $[K]$, $[F_1]$, $\{F_0\}$ - відповідні матриці жорсткості, $\{T\}_i$, $\{U(\tau_i)\}$ - вектори значень температур і переміщень в момент часу τ_i [2].

Нелінійні системи алгебраїчних рівнянь (3), (4) розв'язуємо за допомогою методу простої ітерації.

Як приклад, проведено числові дослідження напружено-деформованого стану структурно неоднорідного по товщині в'язкопружного порожнистого циліндра за теплового навантаження, характерного для процесу відпалу елементів конструкцій.

2. Коваленко А.Д. *Термоупругость*. - Киев: Вища шк., 1975. - 216 с.
3. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *Finite Element Method: Vol 1. The Basis*. – London: “Butterwoth Heinemann”, 2000. – 689 p.

SOME PROBLEMS FOR TRANSVERSALY ISOTROPIC SPACE WITH PERIODIC CRACK SYSTEMS

O. G. Nikolaev, A. S. Krainichenko

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

In the work, for the first time (besides ordinary periodic case) the stresses of the transversely isotropic space are investigated, weakened by periodic systems of flat circular cracks, the centers of which are located on the anisotropy axis, and their planes is perpendicular to it. All cracks are assumed to be under constant normal load. Each periodic system is defined by a representative layer whose planes are perpendicular to the axis of anisotropy, and which contains a finite system of cracks of various sizes. Such a system forms a certain configuration. A specific configuration can include any odd number of cracks of arbitrary size, but with certain restrictions: the cracks are symmetrical relative to the middle plane of the layer, their sizes satisfy a certain condition of convergence. The given restrictions provide practically homogeneous conditions relative to $\tau_{\theta z}$ and V_z on the boundaries of the representative layer (the order of their values is in the range $10^{-10} + 10^{-14}$), which can be considered as conditions at infinity. All problems were solved by the generalized Fourier method (GFM) [1], which was developed for basic transversal-isotropic displacements in shifted oblate spheroidal coordinate systems [2]. The method made it possible to reduce the considered problems to infinite algebraic systems with Fredholm operators. The results of the study were also based on a wide computer experiment, within which stress distributions and stress intensity factor (SIF) were calculated not only in periodic problems, but also in non-periodic ones formed by several representative layers. A comparison of the results showed that the stress in the vicinity of the cracks of the middle layer in the presence of 5-7 layers symmetrically located relative to it (depending on the number of cracks in the layer) have 1-2 correct significant figures after the point in relation to the periodic problem. For SIF, a similar comparison gives 2-3 correct figures. Practical verification of the convergence of the reduction method showed the high efficiency of the GFM. Thus, doubling the reduction parameter from 10 to 20 led to a stabilization of 8-12 significant figures in the obtained stresses. Based on the results of numerical calculations, certain conclusions were drawn. For all considered configurations, the largest SIF corresponds to the largest crack. The larger the crack is located near the given one, the more it relieves the given crack. On the contrary, the smaller the crack located near the data, the more loaded the data. A comparison of the stress intensity factors for different configurations showed that for cracks of the same size, they depend little on the specific configuration. An exception is the SIF of cracks located on or near the boundary of the representative layer.

1. Nikolaev A. G., Prochenko V. S. Generalized Fourier method in spatial problems of the theory of elasticity. Monograph. Kharkov, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute, 2011. 344 p. ISBN: [978-966-662-247-4](#) (In Russian)
2. Nikolaev O. G., Krainichenko A. S. Elastic transversal-isotropic space with two uniaxial parallel circular cracks and associated problems of basicity // Herald of the National KHPI Technical University. Series: Mathematical modeling in technic and technologies. 2022. No. 1. P. 92 – 105. DOI: [10.20998/2222-0631.2022.01.11](#) (In Ukrainian)

ВИКОРИСТАННЯ ANSYS SMART CRACK GROWTH ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ КРАЙОВОЇ ТРІЩИНИ В ІЗОТРОПНОМУ ТІЛІ

Т.В. Ходанен Т.В., В.В Дерев'янюк

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто прямокутне ізотропне тіла з крайовою тріщиною, що виникла на осі симетрії перпендикулярно напрямку рівномірно розподіленого розтягувального навантаження, прикладеного до границь тіла. Для комп'ютерного моделювання було використано студентську версію кінцевоелементного пакету Ansys Mechanical R2024 (рис. 1).

Створення сітки є критичним етапом, який впливає на як на швидкість проведення числових експериментів, так і на можливість виявлення ефектів в околі тріщини (рис. 2). SMART (Simulation for Multi-Physics Analysis of Realistic Timing) Crack Growth є методом, вбудованим у ANSYS, що використовуються для моделювання процесу росту тріщин. Цей метод дозволяє змодельовати процес розвитку тріщин для задач статички з використанням моделі, яка адаптується до мікроструктури матеріалу. SMART Crack Growth враховує низку параметрів для моделювання: вихідний стан тріщини, опцію росту тріщини (в даному випадку Static – для статичного аналізу без динамічних ефектів), критерій зупинки росту тріщини (в даному випадку критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень), контроль перебудови сітки.

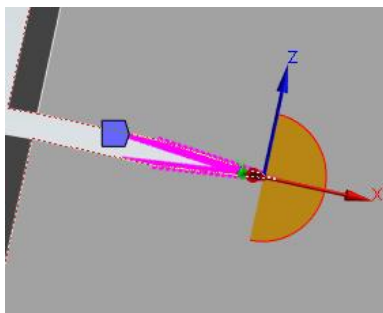


Рис. 1. Моделювання вершини тріщини

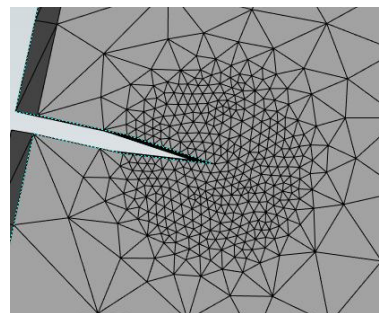


Рис. 2. Сітка в області крайової тріщини

Розмір елемента було оптимізовано за допомогою аналізу чутливості сітки. Метод неструктурованої сітки (UMM) використовується в алгоритмі SMART (Separating, Morphing, Adaptive and Remeshing Technology). На кожному кроці (Рис. 3, а-е) SMART автоматично оновлює сітку, щоб відобразити зміни в геометрії тріщини, викликані її зростанням. Алгоритм використовує локалізовану функцію повторної перебудови сітки в міру зростання тріщини. Після кожної ітерації навколо вершини тріщини SMART концентрує обчислювальну потужність там, де вона найбільше потрібна.

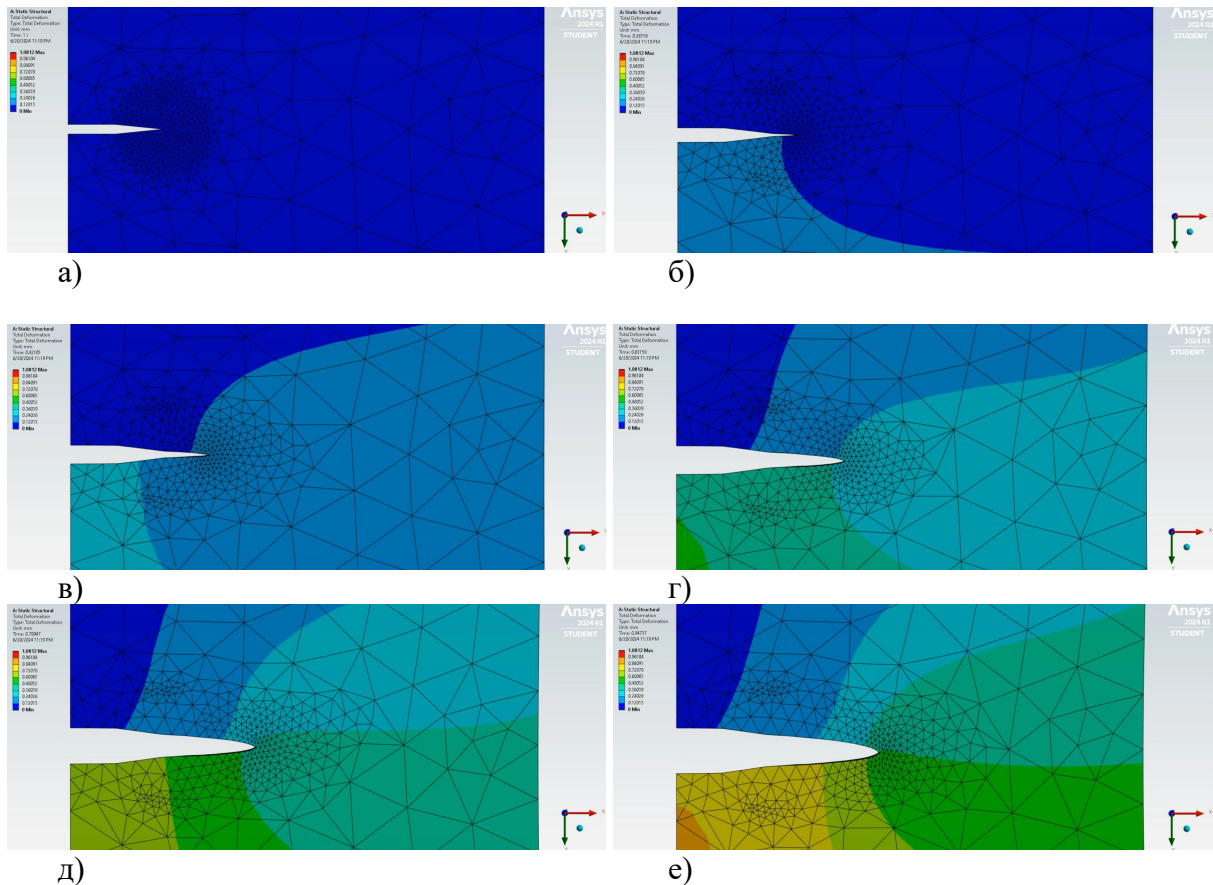


Рис. 3 Приклад ітераційної перебудови сітки та зміни розподілу деформацій у процесі прикладання навантаження

Значення всіх потрібних факторів (розподіл напружень і деформацій, коефіцієнти інтенсивності напружень, напрямок росту тріщини, тощо) доступні для аналізу на кожному кроці розрахунків.

Таким чином, використання Ansys SMART Crack Growth дозволяє моделювати, спостерігати та більш глибоко аналізувати процес розвитку тріщин за рахунок оновлення сітки у процесі деформації з урахуванням зміни геометрії.

HYPERSINGULAR INTEGRAL EQUATIONS IN CRACK PROPAGATION PROBLEMS

Muravski K¹., Strelnikova E.² Kriutchenko D²., Sierikova O.³

¹ *Zelena Gora University, Poland*

² *A.M. Pidhorny Institute of Power Machines and systems NAS of Ukraine*

³ *National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine*

In the context of extending the service life of power machines, petrochemical and energy equipment at many industrial enterprises of Ukraine, in particular during modernization, the main question arises: how to extend the service life of individual units and whether it is necessary to replace outdated equipment to maintain operational efficiency. the reliability of the operation of these units while complying with guarantees of power and efficiency. Given the long-term use of this equipment, its elements are often prone to weakening due to various types of microdefects. The propagating these defects can lead to failure or even complete

destruction of the corresponding structural elements. Therefore, it is important to estimate the time during which these elements can fail under cyclic loading conditions. This issue is also relevant for safe long-term transportation of structural elements according to real cyclo-grams of transportation. This research proposes a method for estimating the durability of structural elements with cracks. It was supposed that the cracks form chains. These defects are quite dangerous, because under the action of cyclic loads they can lead to the fusion of cracks and the destruction of the structural element. The Paris criterion was used to assess crack resistance. The stress intensity factors are calculated by solving the hypersingular integral equation [1]. The method allows us to find out the number of cycles in which defects in the chain will grow to unacceptable sizes. Fatigue durability, determined by the number of cycles to failure under alternating stresses, consists of the number of cycles to the initiation of a crack and the number of cycles of its propagation. This time serves to determine the durability of the structure and the terms of the inter-repair period. The problem is to determine the time (number of cycles), after which the crack grows to a critical size, and the structural element is destroyed. A method of assessing the durability of structural elements in the presence of chains of cracks under conditions of cyclically variable loads has been developed. The method made it possible to find out for how many cycles the defects in the chain will grow to unacceptable sizes in composites [2]. Such calculations must be made to determine the duration of the inter-repair and inter-inspection periods. The obtained data testify to the validity of the recommendations and technical requirements for welds in hydraulic turbines.

References

1. Karaiev, A., Strelnikova, E.: Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 101(1), e201800339, DOI:10.1002/zamm.201800339.
2. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2022) 1068:223-229. [doi:10.4028/p-888232](https://doi.org/10.4028/p-888232).

COMPUTER SIMULATION OF FREE AND FORCED VIBRATION OF COMPOUND FUEL TANKS

Chondhary N.¹, Degtyarev K.², Strelnikova E.², Sierikva O.³

¹*Bennet University, Republic of India*

²*A.M. Pidhorny Institute of Power Machines and Systems NAS of Ukraine*

³*National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine*

The new analytical method and computational technique have been developed for simulating free and forced vibrations of compound fuel tanks in launch vehicles at various mission stages, including conditions of overload and microgravity, while accounting for the impacts of liquid sloshing. This technique employs innovative computational schemes and integrates advanced finite and boundary element methods with an analytical approach and their theoretical foundations. The proposed numerical method is more precise and efficient than existing counterparts and software packages, making it suitable for detailed simulations of fuel tank vibrations. It enables the consideration of coupled effects, including elastic wall deformations, fuel sloshing, varying liquid levels, changes in gravitational acceleration, and different free surface configurations at various mission stages. Additionally, it accounts for the influence of rigid and elastic internal baffles installed to dampen sloshing. To solve the

above mentioned problems of free vibrations for an elastic shell of revolution coupled with liquid sloshing it is necessary to determine three systems of basic functions: modes of liquid in rigid shell under the force of gravity; own modes of the empty shell; modes of the fluid-filled elastic shell without including the force of gravity. Thus, the problem under consideration involves the following steps. First, we obtain the sloshing frequencies and modes using rigid wall assumption. Second, we obtain the natural frequencies and modes of the empty tank with elastic walls. Third, we define the free vibration frequencies and modes of the elastic tank without considering effects of sloshing. Finally, the second order system of differential equations is received for determining the dynamical characteristics of fluid-filled shells in coupled formulation. The numerical simulation of the system obtained will be done using finite and boundary element methods and 7-8 order Runge-Kutta method. The computer technology is based on coupled usage of reduced finite and boundary elements methods together with analytical approaches [1],[2].

1. Avramov, K. V., Strelnikova. E. A Chaotic vibrations of plates two-sided interacting with flux of moving fluid. *Int. Appl. Mech* 50, (2014): 329-335.

2. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2022) 1068:223-229. [doi:10.4028/p-888232](https://doi.org/10.4028/p-888232).

ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ ВЗДОВЖ ШАРІВ КОМПОЗИТНОГО НЕСТИСЛИВОГО МАТЕРІАЛУ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

А. Ю. Глухов, Ю.П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

У даній роботі проведені дослідження поширення пружних хвиль кручення в шаруватому композитному нестисливому матеріалі з початковими напруженнями при проковзуванні шарів. Дослідження виконані в рамках тривимірної динамічної лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями з використанням методу, викладеного в [1].

Розглядається шаруватий композитний матеріал з початковими напруженнями, який складається з шарів двох типів, що чергуються. Матеріали і початкові напружено-деформовані стани є однаковими для розглянутого типу шарів. На границях розділу шарів неперервними є лише нормальні до шарів напруження та переміщення, а всі дотичні напруження рівні нулеві.

Матеріали шарів вважатимемо гіперпружними ізотропними з довільною структурою пружних потенціалів. У разі трансверсально-ізотропних гіперпружних матеріалів шарів будемо вважати, що вісь ізотропії спрямована уздовж осі Oy_3 .

Вважаємо початковий напружений стан однорідним. Також приймаємо, що для кожного з шарів мають місце наступні співвідношення:

$$S_{11}^{0(j)} = S_{22}^{0(j)} \neq S_{33}^{0(j)}, \quad \lambda_1^{(j)} = \lambda_2^{(j)}, \quad h^{(j)} = \lambda_3^{(j)} h^{(j)}, \quad j = 1, 2. \quad (1)$$

В (1) індексами в дужках $(j = 1, 2)$ відзначені всі величини, що відносяться до шарів різних типів. $S_{\pi}^{0(j)}$ - складові тензора узагальнених напружень Лагранжа, $h^{(j)}$ - товщина j -го шару в початковому напружено-деформованому стані, $h^{(j)}$ - товщина j -го шару в природному стані, $\lambda_t^{(j)}$ - коефіцієнти видовження уздовж відповідних вісей.

Також, як і в [1], приймаємо, що

$$u_{\varphi}^{(j)} \equiv 0, \quad u_{\theta}^{(j)} = u_{\theta}^{(j)}(r', y_3, \tau); \quad u_3^{(j)} \equiv 0, \quad u_4^{(j)} \equiv p^{(j)} \equiv 0. \quad (2)$$

У цьому випадку в представленні загальних розв'язків просторових динамічних лінеаризованих задач теорії пружності стосовно до загального розв'язку задачі в циліндричних координатах можна прийняти

$$\Psi^{(j)} = \Psi^{(j)}(r', y_3, \tau); \quad X^{(j)} \equiv 0. \quad (3)$$

Дослідження закономірностей поширення пружних хвиль кручення у шаруватих композитних матеріалах з початковими напруженнями зводиться до побудови розв'язків рівняння руху при задоволенні граничних умов на площинах розділу шарів і умов періодичності Флоке.

Розглянемо поширення хвиль кручення в радіальному напрямку в шаруватому композитному матеріалі з початковими напруженнями, при цьому будемо розглядати тільки випадок хвилі, що йде "на нескінченність". У цьому випадку за аналогією з [1] для визначення "істинної" фазової швидкості поширення хвиль кручення у шаруватому композитному матеріалі з початковими напруженнями приймемо

$$\Psi^{(j)}(r, y_3, \phi) = \Psi^{(j)(0)}(y_3) H_0^{(1)}(rk) e^{-i\phi}; \quad C = ck^{-1}; \quad j = 1, 2. \quad (4)$$

В (4) i - хвильове число і кругова частота; C - "істина" фазова швидкість хвиль кручення; $H_0^{(1)}$ - функція Ханкеля нульового порядку першого роду, що забезпечує поширення хвиль, що йдуть "на нескінченність"; $\Psi^{(j)(0)}$ - амплітудна функція.

Для симетричних та антисиметричних хвиль, що поширюються вздовж шарів нестисливого композитного матеріалу отримані дисперсійні рівняння та їх довгохвильові наближення.

Аналітичні результати приведені в загальній формі для матеріалів з пружним потенціалом довільної форми.

Аналіз рівнянь свідчить, що при поширенні хвиль відбувається взаємодія між шарами композиту.

1. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями / А. Н. Гузь. - К.: А.С.К., 2004. - 672 с.

ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПОБЛИЗУ МЕЖІ РОЗДІЛУ СЕРЕДОВИЩ

А.В. Сохацький

*Університет митної справи та фінансів
Інститут транспортних систем та технологій НАН України*

Створення безпілотних літальних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ є важливою задачею проектувальників. Вплив близько розміщеної межі розділу середовища на аеродинаміку та динаміку руху є недостатньо вивченим питанням. Наявність турбулентного середовища та нестабільність кінематичних параметрів повітряного середовища ускладнюють проблему забезпечення заданого руху транспортного апарата. Окрім цього математичне моделювання турбулентних течій залишається однією з найбільш складних проблем механіки рідини та газу. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми. Це пов'язано зі складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. В доповіді розглядаються проблеми побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та розробки програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних характеристик транспортних засобів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Оцінюються можливості використання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з застосуванням емпіричних моделей турбулентності. Розроблено методику, алгоритми, та комплекс програм для розв'язування задачі аеродинаміки транспортних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Приводяться приклади числового розв'язування з використання персональних електронно-обчислювальних машин. Проведені дослідження показали, що наявність близько розміщеного розділу середовищ має значний вплив на характеристики течії навколо транспортного засобу.

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, моделі турбулентності, аеродинамічні характеристики.

Висновки. В доповіді представлено реалізовано розроблену методику, алгоритм та комплекс програм для розрахунку обтікання транспортного апарата, що рухається поблизу розділу середовищ з використанням гібридного підходу. Наявність розділу середовищ змінює параметри течії навколо транспортного апарата, що спричиняє зміну аеродинамічних характеристик транспортного апарата.

Список літератури

1. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368с.
2. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 234 с.
3. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.
4. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. v. 32, N 8. P. 1598-1605.
5. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equations turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. 1992. Vol. 0439. 21p.

ВПЛИВ ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ДВУШАРОВОГО ТІЛА ПРИ СКЛАДНИХ УМОВАХ КОНТАКТУ

Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається задача визначення напружено-деформованого стану (НДС) двошарового пружно-пластичного тіла кінцевих розмірів під дією абсолютно жорсткого штампу прямокутної форми. Штмп зчеплений з верхнім шаром тіла. Між шарами можливе проковзування і розшарування з врахуванням сил тертя. Розрахунки проведено для різних варіантів складного навантаження (рис.1), при заданих значеннях вектора переміщень $\vec{\Delta}(\Delta_x, \Delta_y)$ штампу (Δ_x – горизонтальний зсув, Δ_y – вертикальна осадка штампу).

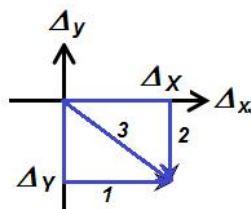


Рис.1. Траєкторії навантаження

Для дослідження НДС тіла в залежності від траєкторії навантаження задача розглядається в приростах. За допомогою методу варіаційних нерівностей в роботах [1, 2] показано, що в цьому випадку задача еквівалентна квазіваріаційної нерівності, яку можливо звести до послідовності задач мінімізації нелінійних функціоналів на кожному кроці зміни зовнішнього навантаження на множині, переміщень, задовольняючих граничним умовам. Дискретизація варіаційних задач здійснюється методом скінчених елементів. Фізичні співвідношення між напруженнями та деформаціями – теорія плинності з лінійним трансляційним зміцненням [3].

Отримані результати для осадки штампу $\Delta Y = -0.0015M$ та горизонтального його зсуву на $\Delta X = 0.001M$.

Обрані матеріали шарів тіла:

верхнього мідно-нікелевий сплав: $E_1 = 1.53 \times 10^5 \text{ мПа}$; $\nu_1 = 0.3$;
 $\nu_1 = 0.3$; $\sigma_{s1} = 124 \text{ мПа}$; тангенційний модуль $E_{t1} = 5 \times 10^3 \text{ мПа}$.

нижнього: нержавіюча сталь марки AISI 201: $E_2 = 1.93 \times 10^5 \text{ мПа}$;
 $\nu_2 = 0.27$; $\sigma_{s2} = 275.8 \text{ мПа}$; тангенційний модуль $E_{t2} = 2 \times 10^4 \text{ мПа}$.

Коефіцієнт тертя між шарами полоси $f = 0.15$.

На рис. 2, 3 показано результати розрахунків інтенсивностей напружень та пластичних деформацій відповідно. У випадку а) – розрахунки за деформаційною теорією (траєкторія 3 на рис.1); б) – навантаження за траєкторією 1; в) – навантаження за траєкторією 2.

У варіанті розрахунку при попередньому зсуві (рис. 2в), максимальна величина пластичних деформацій збільшилась на 22%, відносно розрахунку за деформаційною теорією (рис. 2а), що призвело до більших деформацій на кутах штампа і менших у тілі в цілому. Крім того, відзначено зменшення інтенсивності пластичних деформацій на 8% (рис. 3б та 3а). Порядок прикладення навантаження також впливає на НДС тіла і змінює

як величину, так і розподіл пластичних деформацій у тілі. Максимальна величина пластичних деформацій виросла на 30% між (рис. 2б, 2в).

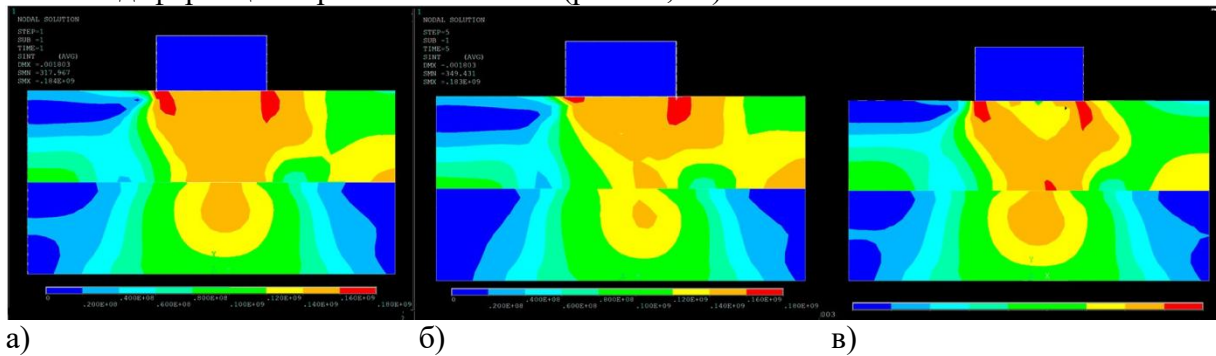


Рис. 2. Інтенсивність напружень

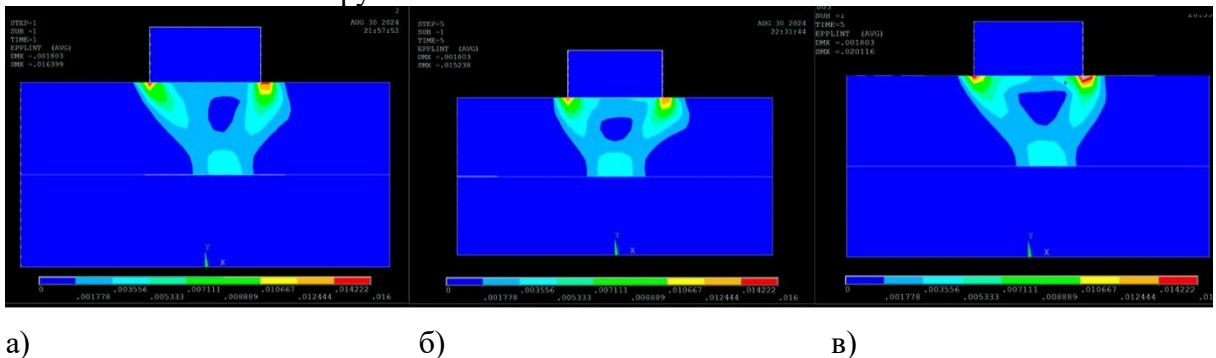


Рис.3. Інтенсивність пластичних деформацій

Список літератури

1. Чернецкий С.О., Швайко М.Ю. Вариційні принципи і математичні методи вирішення граничних задач для кусково-однорідних нелінійних середовищ //Мат. методи та фіз.-мех. поля. –1988. – Вип. 27.- С. 64-67.
2. Чернецкий С.А. Вариационная постановка термоупругопластических задач для слоистых тел при наличии трения //Вопросы прочности и пластичности. Днепропетровск: ДГУ, 1989. - С.43-49
3. Писаренко Г.С., Мажаровський М.С. Рівняння та крайові задачі теорії пластичності і повзучості / К.: Наукова думка, 1989. – 493 с.

ON STRESS CONCENTRATION NEAR A CIRCULAR HOLE IN A CYLINDRICAL SHELL IN THE PRESENCE OF ELLIPTICAL INCLUSIONS

E. L. Hart, O. D. Shebanov

Oles Honchar Dnipro National University

Of the considered options for the arrangement of two elliptical inclusions around a circular hole in a cylindrical shell, the option of their horizontal arrangement using more “hard” inclusions ($k > 1$) turned out to be rational from the point of view of reducing stress concentration, which made it possible to reduce the value of the stress concentration coefficient by $\sim 36\%$. For “softer” inclusions ($k < 1$), their vertical location turned out to be the best option, and the value of the stress concentration factor can be reduced by $\sim 20\%$. These results are in good agreement for the corresponding plate.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ УСТАЛЕНОМУ РУСІ ТРІЩИНИ В ОРТОТРОПНОМУ МАТЕРІАЛІ

О.В. Комаров

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анізотропні матеріали завдяки своїм унікальним фізичним характеристикам набувають дедалі ширшого застосування у багатьох галузях сучасного виробництва і будівництва. Як і у випадку ізотропних матеріалів, при експлуатації анізотропних матеріалів виникає загроза появи і поширення тріщин як найбільш розповсюдженого типу дефектів. Завдяки більш широкому застосуванню, основна увага приділяється дослідженню особливостей напружено-деформованого стану в околі вершини рухомої тріщини в ізотропному матеріалі. Серед основних робіт за даною тематикою можна виділити роботи Фреунда [2] та Іоффе [1]. В даній роботі акцент було зроблено на дослідженні впливу швидкості руху тріщини на напружено-деформований стан в околі вершини рухомої тріщини в анізотропному просторі, а саме напружень на лінії тріщини і розкриття тріщини.

В даній роботі розглядається задача про визначення напружень і переміщень біля вершини тріщини в пружному однорідному ортотропному просторі при русі дефекту з постійною швидкістю. До берегів тріщини прикладене зосереджене навантаження, яке рухається з тою самою швидкістю. Вважається, що один з напрямків анізотропії матеріалу паралельний напрямку руху тріщини.

При побудові розв'язку використано підхід узагальнених комплексних потенціалів, задачу механіки руйнування зведено до системи задач лінійного спряження, розв'язки яких отримано чисельно-аналітичним методом. Досліджено напруження перед фронтом тріщини і розкриття тріщини в залежності від швидкості руху і способів прикладання навантаження. В процесі розв'язання задачі визначено характер впливу ортотропії пружних властивостей матеріалу.

Показано, що в околі правої вершини тріщини, безпосередньо на лінії її просування, величина напружень не залежить від швидкості руху тріщини для випадку ортотропного простору, коли осі пружної симетрії паралельні осям координат. Що не можна сказати про напруження в околі вершини, але не на лінії тріщини, величина яких помітно залежить від швидкості. Як і у випадку нерухомої тріщини, при вершині тріщини присутня особливість для напружень. З ростом швидкості руху тріщини збільшується її розкриття, яке у вершині тріщини дорівнює нулю і зростає при віддаленні від вершини. Збільшення величини зовнішніх зусиль, як і для статичного випадку, призводить до росту величини напружень і розкриття тріщини.

1. Yoffe E. The moving Griffith crack // Phil. Mag. 1951. Vol. 42. P. 739–750.

2. Freund L. B. Dynamic Fracture Mechanics // Cambridge University Press. 1990. P. 310–320.

Доповіді секцій: *Механіка деформівного твердого тіла та механіка рідини, газу та*

плазми (17-18 вересня 2024)

1(81) A.V. Lysenko, E.A. Storozhuk DYNAMICS OF A THREE-LAYER CYLINDRICAL SHELL OF ELLIPTICAL SECTION WITH A RIBBED FILLER ON AN ELASTIC BASE	158
2(70) V.I. Lipovskyi TO THE QUESTION OF CALCULATION OF A COMPOSITE COMBINED TOROIDAL TANK	158
3(89) O.V. Pigol, V.A. Maksymyuk, E.A. Storozhuk, I.S. Chernyshenko A FINITE ELEMENT WITH THE IMPLEMENTATION OF THE KIRCHHOFF-LOVE HYPOTHESIS IN NODES FOR RESEARCHING THE ELASTIC-PLASTIC STATE OF AN ELLIPTICAL CYLINDRICAL SHELL WITH A CIRCULAR HOLE	158
4(90) Р. В.Ткаченко, Н.Є.Ткаченко ЗБУРЕННЯ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ РІДИНИ У ЦЕНТРІ ЦИЛІНДРА З РІДИНОЮ ПРИ ЗМІНІ ВЕЛИЧИНИ ЗОВНІШНЬОЇ СИЛИ	159
5(6) О.З. Галішин, С.М. Склепус МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЗГИНУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ ФОРМИ	160
6(76) O.P. Krukovskyi, V.V. Krukovska THE USE OF STEEL AND INJECTION ROCK BOLTS DURING MINING IN COMPLEX GEOLOGICAL CONDITIONS	161
7(67) E. L. Hart, B. I. Terokhin INFLUENCE OF AN INCLUSION FROM A FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL ON THE STRESS CONCENTRATION IN A CYLINDRICAL SHELL WITH A RECTANGULAR HOLE	162
8(105) M.O. Babeshko, V.G. Savchenko ANALYSIS OF AXISYMMETRIC THERMOPLASTIC DEFORMATION OF STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS MODE AND DIFFERENT MODULI IN TENSION AND COMPRESSION	162
9(111) В.І. Козлов, Ю.І. Лелюх, Л.П. Зінчук ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ І ДИСИПАТИВНИЙ РОЗІГРІВ ПРОСТОРОВОЇ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНОЇ ЕЛІПТИЧНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПАНЕЛІ	162
10(106) Я.П.Троценко ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ РІДИНИ У ЦИЛІНДРИЧНОМУ КАНАЛІ, ЩО МІСТИТЬ ДВІ ДІАФРАГМИ З ОТВОРАМИ ЗМІННОГО ДІАМЕТРУ	165
11(75) V.V. Krukovska, O.P. Krukovskyi CHANGES IN THE NEAR-FACE STRESS FIELD DURING COAL HUMIDIFYING	167
12(101) V.A. Maksymyuk, E.A. Storozhuk, I.S. Chernyshenko ON THE ROLE OF THE SHEARING FORCE ON THE CONTOUR OF THE ELLIPTICAL HOLE ON THE STRESS DISTRIBUTION IN THE SPHERICAL SHELL	167
13(114) К.О. Семенович НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА СПІВОСНОГО РЕЗЕРВУАРУ, ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОГО РІДИНОЮ. ПРИКЛАДИ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМИ ДЛЯ РІЗНИХ ВИПАДКІВ ЗБУДЖЕННЯ РУХУ	168
14(115) P. Steblyanko SOLVING PROBLEMS OF THE THERMOPLASTICITY THEORY FOR PLATES AND SHELLS USING TWO-DIMENSIONAL SPLINES	169
15(127) M. Altoumaimi, V. Loboda A SHEARED ACTION OF A RIGID STAMP TO THE QUASI-CRYSTALLINE HALF-SPACE	170

DYNAMICS OF A THREE-LAYER CYLINDRICAL SHELL OF ELLIPTICAL SECTION WITH A RIBBED FILLER ON AN ELASTIC BASE

A.V. Lysenko, E.A. Storozhuk

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of the Ukraine

The paper considers a three-layer cylindrical shell of an elliptical cross-section with a discrete longitudinal-transverse ribbed filler, which interacts with an elastic Winkler base and is under the action of a non-stationary load. The equations of oscillations of this elastic structure were obtained on the basis of the relations of the theory of S.P. Timoshenko on the stationarity conditions of the Hamilton–Ostrogradsky functional. The numerical algorithm for solving the given problem is based on the use of the integro-interpolation method of constructing difference ratios by spatial coordinates and an explicit difference scheme by time coordinate. The dynamic behavior of a three-layer cylindrical shell of elliptical cross-section with longitudinal-transverse ribbed filler on an elastic base under the action of impulse loading was studied.

TO THE QUESTION OF CALCULATION OF A COMPOSITE COMBINED TOROIDAL TANK

V.I. Lipovskyi

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

The paper discusses the engineering technique for calculating the parameters of isogrid composite reinforcement in the combined design of a torus loaded with internal pressure. The composite reinforcement is created using longitudinal-transverse winding. The parameters of the reinforcement are determined using equations of equilibrium and deformation theory of strength. The weight of such a combined composite torus was determined and compared with a tank produced using continuous longitudinal-transverse winding.

A FINITE ELEMENT WITH THE IMPLEMENTATION OF THE KIRCHHOFF–LOVE HYPOTHESIS IN NODES FOR RESEARCHING THE ELASTIC-PLASTIC STATE OF AN ELLIPTICAL CYLINDRICAL SHELL WITH A CIRCULAR HOLE

O. V. Pigol, V.A. Maksymyuk, E.A. Storozhuk, I.S. Chernyshenko

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of the Ukraine

For calculations of deformation beyond the elastic limit of a thin cylindrical shell with elliptical cross-section, weakened by a circular hole, a finite element (FE) with a discrete implementation of the Kirchhoff–Love hypotheses was developed. The proposed version of the finite element method (FEM) has a number of features. First, the relations in vector form are used for the shell deformation components. Secondly, when constructing the FE shell, the projections of the displacement vector on the axis of the rectangular Cartesian coordinate system are approximated, and not its components in the curvilinear orthogonal coordinate

system. Thirdly, the vector of rotation angles of the normal is not calculated by formulas, as is customary in classical FEM, but is approximated by biquadratic polynomials of the serendipity type with realizing the Kirchhoff–Love hypotheses only at the FE nodes. The FE constructed in this way satisfies the conditions of the rotation angles continuity of the normal, and its relations do not contain derivatives of approximating functions above the first order, which greatly simplifies the discretization process of the problem.

ЗБУРЕННЯ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ РІДИНИ У ЦЕНТРІ ЦИЛІНДРА З РІДИНОЮ ПРИ ЗМІНІ ВЕЛИЧИНИ ЗОВНІШНЬОЇ СИЛИ

Р.В.Ткаченко¹, Н.Є.Ткаченко²

¹*Національний авіаційний університет,*

²*Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України*

Метою цієї роботи є визначення характерних особливостей нелінійних коливань рідини у центрі циліндра, які є фактично показником збудження нелінійних механізмів коливань вільної поверхні рідини у циліндрі, при сумісному русі циліндра і платформи під дією зовнішнього гармонічного навантаження в околиці точок з мінімальними значеннями амплітуд зовнішніх сил, при яких коливання вільної поверхні рідини потрапляють в діапазон нелінійних збуджень.

Розглянемо рух у горизонтальній площині абсолютно твердого циліндричного резервуару, частково заповненого рідиною з вільною поверхнею, приєднаного пружиною до платформи, яка сама здійснює рух. До платформи прикладено гармонічну силу $F = A \cos(\omega t)$. Податливі пружини з малими жорсткостями не розглядалися, щоб обмежити рух циліндра. Порівняння проводилося із жорстким заземленням. Вважаємо, що рідина однорідна, стислива, ідеальна. У початковий момент часу система перебуває у спокої, вихрові рухи рідини відсутні, впливом сил поверхневого натягу нехтуємо. При побудові математичної моделі руху системи застосуємо варіаційний принцип Гамільтона-Остроградського. Використовуємо варіаційний підхід з концепцією розділення змінних, запропонований О.С. Лімарченком [1,2]. Дослідження нелінійної динаміки спільного руху резервуара, рідини, що його частково заповнює, та рухомої платформи, до якої пружиною приєднаний резервуар, проводиться на основі багатомодової моделі. Здійснюємо перехід від дискретно-континуальної структури системи до її дискретної моделі у два етапи. Розв'язавши задачу про рух обмеженого об'єму рідини в рухомому циліндрі із заданими кінематичними умовами на твердих стінках та лінеаризованою умовою на вільній поверхні рідини, визначаємо власні коливання рідини ω_n . Розкладаємо вирази для величин ϕ , $\hat{r}$ в ряди по формах власних коливань рідини ω_n з коефіцієнтами a_i , b_i . Підставляючи знайдені розклади у функцію Лагранжа, після перетворень знайдемо функцію Лагранжа для невіЛЬНОї дискретної системи, виражену через коефіцієнти a_i , b_i . Але нелінійна умова на вільній поверхні рідини залишається механічною в'яззю. Її задовольняємо наближено, використовуючи метод Галеркіна. Із функції Лагранжа для вільної дискретної системи знаходимо систему рівнянь Лагранжа другого роду в амплітудних параметрах коливання рідини a_i і в параметрах поступального переміщення резервуара $\hat{x}$ і платформи. Для чисельних досліджень приймалася модель, куди входять 12 форм коливань рідини. Виконано розрахунки для моделей з пружним та жорстким закріпленнями. При жорсткому закріпленні маса резервуара збільшена на масу платформи. Розглядалися такі випадки

співвідношення мас резервуара, платформи та рідини у безрозмірному вигляді: $M_{res} = 0,25Ml$, $M_{fr} = 5Ml$, де Ml – маса рідини. До платформи прикладена сила $F = A \cos(\dot{u}t)$, где $\dot{u} = 3.0; 3.5; 3.8; 4.0; 4.1; 4.13; 4.14; 4.147; 4.157; 4.2; 4.3; 4.5; 4.8; 5.2; 5.5$ (1/с); жорсткість пружини приймалася $c=50$ кН/м, 100кН/м, 200 кН/м, 500 кН/м, 2000 кН/м. (Для циліндра радіусу 1м і глибини заповнення 1м резонансна частота коливань рідини буде $\dot{u}'= 4,1434$ (1/с)). Спочатку визначаємо амплітуди зовнішніх сил, при яких коливання вільної поверхні рідини потрапляють в діапазон нелінійних збуджень, де виявляються основні ефекти нелінійних коливань: модуляція коливань, дрейф середнього значення, горби хвиль більше западин, антирезонанс і система немає режиму усталених коливань.

Амплітуди зовнішніх сил змінюються у широкому діапазоні залежно від зміни частот та жорсткості пружини (від 210Н до 200кН). Зазначимо, що є невеликі діапазони частот коливань за наявності пружини, де амплітуди різко зменшуються, а потім знову зростають. Зазначені зони змінюються при зміні жорсткостей пружини та частот коливань зовнішньої сили (для кожної жорсткості пружини є лише певна частота, де з'являється така зона). При підході до неї, як при фіксованих жорсткостях, так і при фіксованих частотах, збільшується період модуляції коливань і на даному часовому інтервалі відбувається вихід на впорядкований режим всіх елементів системи, при якому збільшується амплітуда коливань вільної поверхні рідини. Тут зосередимось на коливаннях рідини в центрі циліндра. Середнє значення коливань зсунуто вгору, горби більше западин, тобто тут немає виходу на усталений режим. При частотах $\dot{u} = 3.0; 3.5$ це явище не спостерігається. За відсутності пружини маємо суттєву модуляцію. У дорезонансній зоні маємо подібні області в околі частоти $\dot{u} = 3,8$ (1/с) при $c=100$ кН/м, де $A = 210$ Н, і в околі частоти $\dot{u} = 4,0$ (1/с) при $c=200$ кН/м, $A=620$ Н, в зоні при $\dot{u} = 4.14$, $c=500$ кН/м, $A=535$ Н. У зарезонансній зоні аналогічна поведінка системи (вихід на впорядкований режим) відбувається в околі частоти $\dot{u} = 4.2$ (1/с) при $c=200$ кН/м, $A=520$ Н. За відсутності пружини мінімальне значення амплітуди зовнішньої сили $A = 231$ Н спостерігається в околі частот $\dot{u} = 4.25-4.3$ (1/с). Тут за відсутності пружини маємо більші значення амплітуд коливань. Відмітимо, що тільки в околі частот $\dot{u} = 4.25-4.3$ (1/с) при всіх значеннях зовнішньої сили і значеннях жорсткостей при відсутності пружини маємо більші значення амплітуд коливань ніж при наявності пружини.

1. Лимарченко О.С., Ясинский В.В. Нелинейная динамика конструкций с жидкостью. – Киев: НТТУ КПИ, 1997. – 338 с.
2. Limarchenko O., Tkachenko R. Influence of Spring Attachment on the Dynamics of a Fluid-Filled Cylindrical Tank on a Moving Platform // Int. A

МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЗГИНУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ ФОРМИ

О.З. Галішин, С.М. Склепус

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

Функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) належать до класу сучасних матеріалів із сімейства композитів. Зазвичай вони складаються з двох мікроструктурних фаз, таких як метал і кераміка, що робить їх стійкими до високих температур, корозії та механічних навантажень. Механічні й інші властивості ФГМ безперервно та плавно змінюються вздовж певних напрямків відповідно до

встановленого закону. Це дає змогу уникнути різких міжламінарних розривів та концентрації напружень, спричинених невідповідністю властивостей двох різних матеріалів. Завдяки високим показникам міцності та термостійкості, керамо-металеві ФГМ використовуються в різних інженерних сферах, включно з аерокосмічною та хімічною промисловостями, енергетикою, суднобудуванням тощо.

Як показує аналіз літератури, кількість робіт, присвячених дослідженню деформування функціонально-градієнтних пологих оболонок складної форми в плані є досить обмеженою і, в даний час продовжується пошук ефективних методів розв'язання таких задач.

В даній роботі розроблено новий чисельно-аналітичний метод розв'язання задач деформування згину тонких пологих оболонок складної форми в плані із функціонально-градієнтних матеріалів. Постановку виконано у рамках класичної теорії оболонок. Для варіаційної постановки задачі побудовано функціонал Лагранжа, що базується на принципі можливих переміщень. Варіаційні задачі розв'язувалися методом Рітца в поєднанні з методом R-функцій. Метод R-функцій дозволяє точно врахувати геометричну інформацію про крайову задачу і подати наближений розв'язок у вигляді формули – структури розв'язку, яка точно задовольняє всім (загальна структура) або частині (часткова структура) граничним умовам. Розв'язано тестові задачі для однорідної жорстко закріпленої та функціонально-градієнтної шарнірно опертої пластини, що знаходяться під дією рівномірно розподіленого навантаження різної інтенсивності. Результати для прогинів та напружень, отримані за допомогою розробленого методу, порівняно із розв'язками, отриманими іншими методами. Розв'язано задачу згину пологої оболонки складної форми із функціонально-градієнтного матеріалу Ti-6Al-4V/aluminum oxide (титановий сплав армований частинками оксиду алюмінію). Досліджено вплив градієнтних властивостей матеріалу та геометричної форми на напружено-деформований стан.

THE USE OF STEEL AND INJECTION ROCK BOLTS DURING MINING IN COMPLEX GEOLOGICAL CONDITIONS

O.P. Krukovskyi, V.V. Krukovska

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine

The development of supporting schemes for permanent workings is of great importance when they are driven in complex geological conditions. With the help of numerical simulation methods, the process of the rock-bolts arch formation and the stability of the permanent working, which is supported with steel and injection rock bolts, were investigated. It is shown that steel and injection rock bolts supplement each other well, increasing the stability of the permanent working. Injection anchors eliminate the possibility of destruction of host rocks and effectively reduce their permeability. Steel anchors better restrain the expansion of the zone of increased cracking.

INFLUENCE OF AN INCLUSION FROM A FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL ON THE STRESS CONCENTRATION IN A CYLINDRICAL SHELL WITH A RECTANGULAR HOLE

E. L. Hart, B. I. Terokhin

Oles Honchar Dnipro National University

As a result of a numerical study of the behavior of thin-walled cylindrical shells with a rectangular hole and an annular inclusion made of a functionally graded material, the influence of the elastic modulus of the inclusion and its width on the stress concentration coefficient in the shell was analyzed. The rational parameters of a radially inhomogeneous inclusion made of a functionally graded material are determined, at which the stress concentration coefficient decreases by ~28% and the corresponding deformations - by ~41%.

The presence of inclusions of a functionally graded material with certain mechanical properties and geometric parameters makes it possible to influence not only the magnitude of the stress concentration coefficient in plate-shell structural elements near local stress concentrators, but also the stress distribution over their surface.

ANALYSIS OF AXISYMMETRIC THERMOPLASTIC DEFORMATION OF STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS MODE AND DIFFERENT MODULI IN TENSION AND COMPRESSION

M.O. Babeshko, V.G. Savchenko

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences

e-mail: bab41@ukr.net e-mail: savchenko_vitalij@ukr.net

Methods for solving problems of thermoplasticity for layered spatial bodies and shells of revolution in processes of axisymmetric non-isothermal loading have been developed, taking into account the dependence of material properties on the stress mode and multimodality. It is assumed that isotropic materials are deformed within and beyond the limits of elasticity, and orthotropic materials are deformed within the limits of elasticity. Constitutive equations are used to describe the deformation of isotropic materials, which take into account the dependence of material properties on temperature, load history, and the stress mode. For orthotropic materials, two variants of nonlinear relations for materials with different moduli in tension and compression are used. The loading process is divided into stages, at each of which the solution to the problem is determined in the process of successive approximations. Numerical results were obtained and analyzed.

ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ І ДИСИПАТИВНИЙ РОЗІГРІВ ПРОСТОРОВОЇ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНОЇ ЕЛІПТИЧНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПАНЕЛІ

В.І.Козлов, Ю.І.Лелюх, Л.П.Зінчук

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Шаруваті циліндричні панелі та оболонки, що мають некруглий поперечний переріз та складені з непружних металевих та п'єзоактивних шарів, як складові елементи різноманітних конструкцій знаходять широке застосування в багатьох галузях сучасної техніки. Досить часто у процесі експлуатації вони перебувають під дією гармонічних за часом навантажень з високими амплітудами і частотами близькими до резонансних. Це зумовлює потребу в дослідженні термоелектромеханічних

характеристик таких елементів, зокрема з урахуванням дисипативного вібророзігріву, який виникає через гістерезисні втрати у в'язкопружному матеріалі, і може призвести до втрати його працездатності [1].

Спираючись на концепцію комплексних електромеханічних характеристик [1] було розроблено підхід до дослідження термоелектромеханічної поведінки тривимірних неоднорідних тіл з електров'язкопружних матеріалів при вимушених коливаннях з використанням методу скінченних елементів [2]. У випадку незалежності фізико-механічних властивостей матеріалів шарів від температури знаходження розв'язку задачі про вимушені коливання та дисипативний розігрів зводиться до розв'язування лінійної задачі електров'язкопружності з комплексними електромеханічними параметрами і задачі нестационарної теплопровідності з відомим джерелом тепла. Для цього використовувалось варіаційне формулювання задачі електромеханіки, яке зводить її розв'язування до визначення стаціонарних точок функціоналу [2]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V (c_{ijkl}^E \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - 2e_{ijk} \varepsilon_{ij} E_k - \mu_{kl} E_k E_l - \rho \omega^2 u_k u_k) dV - \int_{\Sigma_p} (p_{nk} u_k - \sigma^e \varphi) d\Sigma_p.$$

За знайденими в процесі розв'язку методом скінченних елементів значеннями переміщень та електричного потенціалу знаходяться величини деформацій, напружень, напруженості електричного поля та електричного зміщення, на основі яких у кожному елементі визначається дисипативна функція D_M . Знаходження розв'язку задачі нестационарної теплопровідності з відомим джерелом тепла зводиться до розв'язання варіаційної задачі для функціоналу [2]

$$I = \frac{1}{2} \int_V \lambda_{ij} T_{,i} T_{,j} + 2\rho c \frac{\partial T}{\partial t} T - 2D_M T dV + \frac{1}{2} \int_S \alpha_T (T - T_c) T dS.$$

Було проведено чисельне дослідження термоелектромеханічної поведінки тришарової панелі, яка вирізана з порожнистого еліптичного циліндра і має довжину 0,1 м, товщину 0,01 м та центральний кут π . Піввісі еліптичного перерізу складають 0,1 м, та 0,05 м. Приповерхневі шари панелі товщиною 0,0025 м виготовлено із п'єзокераміки PZT (EC-65) з товщиною поляризацією, а внутрішній пасивний шар – із алюмінію. Розглядалась шарнірно оперта по контуру панель. Вважалося, що зовнішні шари електродовані, а металевий шар має нульовий потенціал. В околі знайдених власних частот розраховувався термомеханічний стан даної панелі в залежності від механічних та електричних умов навантаження. На рис. 1 представлено контурні графіки розподілу модуля комплексного товщинного зміщення еліптичної циліндричної панелі при величині амплітуди внутрішнього тиску $P_0 = 2 \cdot 10^4$ Па (рис.1а) для випадку, коли на зовнішніх електродах задано нульовий потенціал, та температури дисипативного розігріву при тому ж навантаженні (рис.1б) на 600 с розігріву на першій резонансній частоті $2,4207 \cdot 10^4$ рад/с.

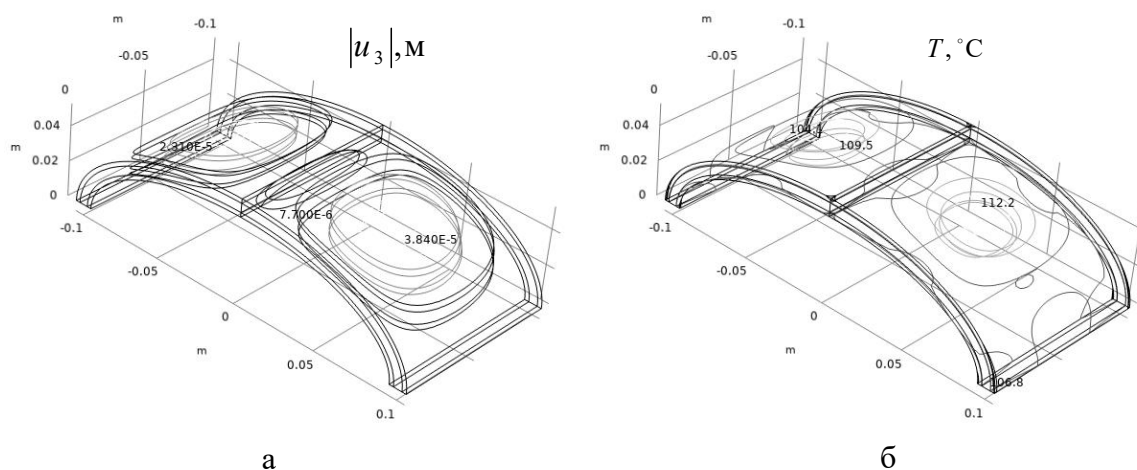


Рис. 1

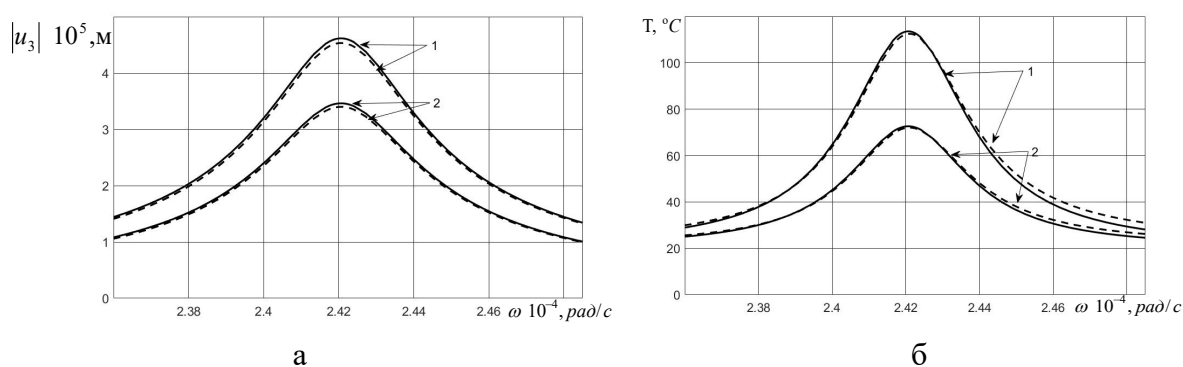


Рис. 2

На рис. 2 наведено амплітудно- (рис.2а) та температурно- частотну (рис.2б) характеристики в околі першої резонансної частоти. Суцільна лінія відповідає механічному навантаженню внутрішнім тиском з амплітудою $P_0 = 2 \cdot 10^4$ Па (крива 1) і $P_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Па (крива 2), а штрихова – електричному навантаженню, коли на зовнішніх еліптичних поверхнях задано електричний потенціал з амплітудою $\varphi_0 = 100$ В (крива 1) та $\varphi_0 = 75$ В (крива 2). Також в околі частоти першого резонансу було проведено оцінку робоздатності розглянутої панелі. За критерій довговічності при цьому приймалося досягнення принаймні в одній точці п'єзоелектричних шарів температури деградації матеріалу при якій втрачаються п'єзоактивні властивості матеріалу [1].

1. Карнаухов В.Г., Михайленко В.В. Нелинейная термомеханика пьезоэлектрических неупругих тел при моногармоническом нагружении. – Житомир: ЖГТУ, 2005. – 428с.
2. Karnaukhov V.G., Kozlov V.I., Zavgorodnii A.V. et al. Forced Resonant Vibrations and Self-Heating of Solids of Revolution Made of a Viscoelastic Piezoelectric Material // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, N 6. – P. 614–622.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ РІДИНИ У ЦИЛІНДРИЧНОМУ КАНАЛІ, ЩО МІСТИТЬ ДВІ ДІАФРАГМИ З ОТВОРАМИ ЗМІННОГО ДІАМЕТРУ

Я.П. Троценко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

e-mail: yaroslav.trotsenko@knu.ua

Течія рідини чи газу у каналах з перешкодами широко зустрічається як в природі, так і в технічних або наукових приладах. При певних умовах у таких системах можуть виникати автоколивання середовища і, як наслідок, збуджуватись тональний звук. Детальне вивчення подібних процесів дозволяє застосовувати більш ефективні практичні заходи для діагностики та виявлення причин небажаних акустичних коливань. З розвитком комп'ютерної техніки наприкінці ХХ століття набули поширення чисельні моделювання подібних течій. У випадку малих чисел Маха для цього переважно використовуються гібридні методи, згідно з якими загальна задача розділяється на акустичну та гідродинамічну частини, які розв'язуються окремо [1].

В даній роботі розглядалася течія рідини у напівнескінченному циліндричному каналі, що містить дві однакові діафрагми з отворами змінного діаметру, при швидкостях значно менших за швидкість звуку в середовищі (рис. 1). Відомо, що в подібних системах розміри джерел звуку, що породжується потоком, – малі у порівнянні з довжиною звукової хвилі. Тому були взяті за основу такі гіпотези: потужність збуджених потоком акустичних коливань є значно меншою за потужність самого потоку, і породжений звук не впливає на його характер. У зв'язку з цим задача розв'язувалася в межах моделі в'язкої нестисливої рідини. Також припускалося, що рух рідини в області між діафрагмами є близьким до осесиметричного.

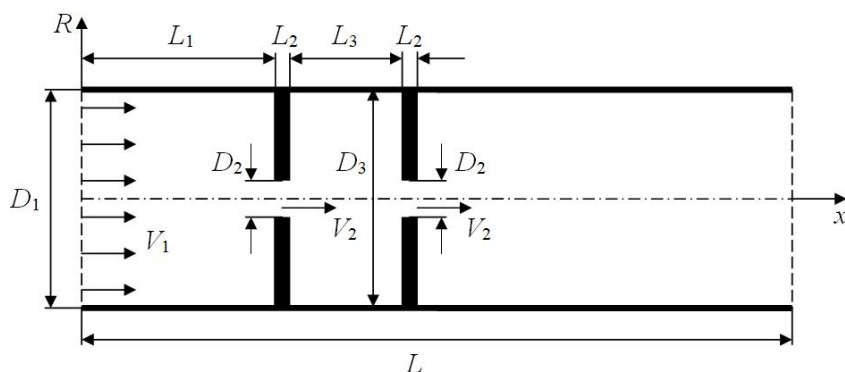


Рис. 1. Поздовжній переріз каналу.

Розв'язання поставленої задачі проводилося чисельно за методом скінченних об'ємів з використанням бібліотек інструментарію з відкритим кодом OpenFOAM. Використовувалася ортогональна блочно-структурована сітка зі згущенням вузлів в отворах діафрагм та при наближенні до їх поверхонь. Для обчислення об'ємних інтегралів за контрольним об'ємом застосовувалася узагальнена процедура Гауса. Нормальні градієнти швидкості на поверхні елементів, необхідні для обчислення дифузійних членів, обчислювалися зі значень швидкості в центроїдах сусідніх комірок за схемою другого порядку. Для інтерполяції конвективних членів використовувалася TVD (Total-Variation Diminishing) форма центрально-різницевої схеми для векторного поля з обмежувачем потоку типу Sweby [2]. За схему дискретизації похідної за часом обиралися неявна триточкова несиметрична схема другого порядку з різницями назад.

Зв'язаний розрахунок поля швидкості і тиску проводився за допомогою процедури PISO (Pressure Implicit Split Operator) [3]. Для розв'язання отриманої системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь використовувалися ітераційні розв'язники PCG та PBiCG (Preconditioned (Bi-)Conjugate Gradient), що побудовані на основі методу спряжених/біспряжених градієнтів для симетричних та асиметричних матриць. За передобумовлення було обрано спрощені схеми неповної факторизації Холецкого DIC (Diagonal-based Incomplete Cholesky preconditioner) та неповної LU-факторизації DILU (Diagonal-based Incomplete LU preconditioner) для симетричних і асиметричних матриць відповідно [4]. Задача розв'язувалася з використанням обчислювальних потужностей комплексу SKIT Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова Національної академії наук України [5].

В роботі показано, що в певних межах числа Рейнольдса $Re = V_2 D_2 / \nu$ у порожнині між діафрагмами встановлюється циркуляційний рух. З передньої кромки першої діафрагми зривається поверхневий шар та утворює кільцевий зсувний шар в області між звуженнями. При наближенні до другої діафрагми у ньому утворюється послідовність кільцевих вихорів, що взаємодіють із поверхнею діафрагми та призводять до виникнення тонального звуку (рис. 2 а). При збільшенні діаметру отворів діафрагм збільшується кут відриву примежового шару від передньої кромки першої діафрагми, внаслідок чого зменшується частка кінетичної енергії струменя, що бере участь у циркуляційному русі всередині порожнини між діафрагмами. При цьому значення критичного числа Рейнольдса, при якому починає збуджуватися тональний звук, а також числа Струхала $St = f D_2 / V_2$ збільшуються. При досягненні певного значення діаметру отворів діафрагм циркуляційний рух дестабілізується, через що процес утворення кільцевих вихорів у зсувному шарі втрачає періодичність (рис. 2 б).

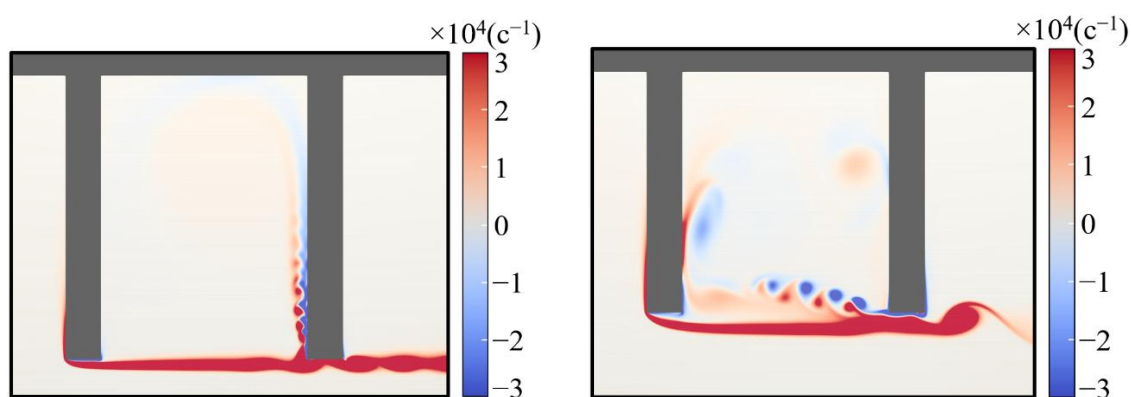


Рис. 2. Поле завихреності в половині поздовжнього перерізу каналу:

а – $D_1/D_2=9$, $Re=2700$; б – $D_1/D_2\approx 3.9$, $Re\approx 4685$.

1. Малюга В.С. Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів випромінювання звуку : дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.02.05 / Національна академія наук України. Київ, 2018. 324 с.
2. Chakravarthy S. R., Osher S. High resolution application of the Osher upwind scheme for the Euler equation. *Computational Fluid Dynamics* : Proceedings of the 6th Conference, Danvers, Massachusetts, USA. July 13–15, 1983. New York, NY, 1983. P. 363–372.
3. Issa R. I. Solution of implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986. Vol. 62, No. 1. P. 40–65.

4. Barrett R., Berry M., Chan T. F., Demmel J., Donato J. M., Dongarra J., Eijkhout V., Pozo R., Romine C., Van der Vorst H. Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods. 2nd ed. Philadelphia : SIAM, 1994. 107 p.
5. Головинський А. Л., Маленко А. Л., Сергієнко І. В., Тульчинський В. Г. Енергоефективний суперкомп'ютер СКІТ-4. *Вісник НАН України*. 2013. № 2. С. 50–59.

CHANGES IN THE NEAR-FACE STRESS FIELD DURING COAL HUMIDIFYING

V.V. Krukovska, O.P. Krukovskyi

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine

The water injection into coal seams is used to reduce their outburst hazard. Taking into account the moisture effect on coal characteristics, the process of the stress field formation was investigated in two cases: with natural moisture of coal and after water injection. It is shown that high water content significantly reduces the difference between the stress field components (Q^* parameter) in the near-face zone of the coal seam. Twenty hours after the advance of the mine face, Q^* parameter values in wet coal in the three-meter near-face zone is 1.5-5 times less than in a coal seam with a natural moisture content of 1%. The changes in coal characteristics leads to a decrease in the maximum component of the principal stress tensor in the near-face zone by 4-16%. At the same time, the values of the minimum component of the principal stress tensor in wet coal increase by 10-75%. The zone of inelastic deformations after water injection becomes somewhat larger; it increases by 11% in 2 days.

ON THE ROLE OF THE SHEARING FORCE ON THE CONTOUR OF THE ELLIPTICAL HOLE ON THE STRESS DISTRIBUTION IN THE SPHERICAL SHELL

V.A. Maksymyuk, E.A Storozhuk, I.S. Chernyshenko

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of the Ukraine

In problems of stress concentration near a curved hole in spherical shells under internal pressure, it is usually assumed that the cover transmits only a shearing force to its contour. Several options for changing the shearing force along the contour of the elliptical hole are considered. A number of qualitative and quantitative mechanical effects were revealed. The most interesting thing is the appearance of a compression on the inner surface near the wide part of the hole. The cause of the compression is significant ellipticity, regardless of the distribution or presence of shearing force. With increasing ellipticity, the deformation process near the hole changes from all-round stretching and bending, characteristic of a shell with a circular hole, to predominantly stretching near the narrow part of the hole and bending near

the wide one. A variable shearing force causes a shift of the largest stresses in the shell from a wide part to a narrow one, which is not observed with a constant shearing force.

НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА СПІВОСНОГО РЕЗЕРВУАРУ, ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОГО РІДИНОЮ. ПРИКЛАДИ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМИ ДЛЯ РІЗНИХ ВИПАДКІВ ЗБУДЖЕННЯ РУХУ

К.О. Семенович

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

В галузі динаміки конструкцій з рідиною з вільною поверхнею докладно були вивчені задачі, коли рух несучого тіла є поступальним і відбувається за наперед заданим законом. Важливо відзначити, що в такому разі частотний розподіл в системі при моделюванні її руху на основі багатомодової моделі збігається з випадком нерухомої конструкції. Натомість відомо, що у випадку сумісного руху конструкції-носія і рідини з вільною поверхнею відбувається суттєва зміна значень і черговості частот в залежності від параметрів системи. Таким чином, врахування фактору сумісності при побудові моделі дозволяє більш повно вивчити поведінку системи, дослідити навколорезонансні режими руху, які можуть нести потенційну небезпеку. Задачі кутового руху системи представляють практичний інтерес і є менш дослідженими порівняно із задачами поступального руху конструкції-носія.

Розглянуто задачу сумісного руху співвісного циліндричного резервуару на маятниковому підвісі, частково заповненого ідеальною рідиною. Врахування взаємовпливу рідини з вільною поверхнею та резервуару дозволяє вивчити різноманітні прояви нелінійної взаємодії між різними власними формами рідини та вплив їх на динаміку резервуара за рахунок того, що в сумісному русі має місце значна зміна розподілу власних частот системи.

Отримано чисельні результати моделювання перехідного руху системи співосний резервуар-рідина та динаміки під дією гармонічного навантаження, проаналізовано ступінь прояву нелінійних механізмів, розглянуто взаємовплив різних форм коливань рідини та особливості динамічної взаємодії рідини з резервуаром. Результати чисельного моделювання показали, що вплив нелінійних механізмів в системі на кутові коливання резервуару є незначним (аналогічно до випадку звичайного циліндричного резервуару), хоча як амплітуди, так і частоти кутових коливань змінилися. В той же час коливання вільної поверхні рідини зазнали значних якісних і кількісних змін.

1. *Луковський І. О.* Дослідження вимушених нелінійних коливань рідини у кругових циліндричних ємностях на основі семимодової моделі третього порядку / І. О. Луковський, О. В. Солодун // Проблеми динаміки та стійкості багатовимірних систем. – Київ: Праці Інституту математики НАН України. – Т. 47. – 2003. – С. 161–179.
2. *Konstantinov A.V., Limarchenko O.S., Lukyanchuk V.V., Nefedov A.A.* Dynamic methods of damping the oscillation in structure–free-surface fluid system, *Int. Appl. Mech.*, 2019. – 55, N 1. – P. 58-67.
3. *Limarchenko O.S.* Specific features of application of perturbation techniques in problems of nonlinear oscillations of a liquid with free surface in cavities of

- noncylindrical shape // Ukrainian Mathematical Journal. – 2007. – 59, N 1. – P. 45-69.
4. *Limarchenko O.S., Matarazzo G.* Rotational motion of structures with tanks partially filled with liquid, – FADA Ltd. Kiev, 2003. – 286 p.
 5. *Limarchenko O.S., Semenovich K.O.* Energy redistribution between the reservoir and liquid with free surface for angular motions of the system // J. of Mathem. Sci. – 2017. – 222, N 3. – P. 296 – 303.

SOLVING PROBLEMS OF THE THERMOPLASTICITY THEORY FOR PLATES AND SHELLS USING TWO-DIMENSIONAL SPLINES

P. Steblyanko

*S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv,
Ukraine; e-mail: caf-vmi@ukr.net*

The main task of the non-stationary theory of thermoplasticity is to determine the displacements of the middle surface (speeds of displacements) and specific forces and moments, deformation of the middle surface, shifts, angles of rotation, curvatures, torsions that occur in the shell (plate) in the process of thermoforce loading, when some elements of the body work beyond the elastic limit of the material.

The complete system contains equations of motion in projections on the undeformed axes of the shell, physical relations and geometric equations [1]. All unknown quantities are presented in the form of two-dimensional spline functions at a certain moment in time. In this section, when solving problems of thermoplasticity, both cubic B-splines and stress splines are used [2, 3].

In the course of the work, the following results were obtained:

A new version of the method has been developed for calculating the non-stationary thermoplastic stress-strain state of spatial bodies and shells during non-isothermal loading processes along trajectories of small curvature, which differs from existing methods in higher accuracy and gives the third order of accuracy of the method in spatial coordinates. The proposed algorithm takes into account both the type of stress state and the possible loosening of the material during the construction process.

Expressions for a two-dimensional B-spline of the third order and a two-dimensional stress spline have been obtained, which can be used to approximate the differential operators of the complete system of equations in partial derivatives, and can be used to obtain interpolated values of functions with the fourth and, respectively, the fifth order of accuracy in terms of coordinates between nodes .

1. Steblyanko P.A., Shevchenko Yu.N. Computational Methods in Stationary and Nonstationar Thermal Plasticity Problems. In.: "Encyclopedia of thermal Stresses. In. 11 volumes (Ed. R.B.Hetnarski). – New York, Dordrecht: Springer, 2014. Vol. 2, C-D, P. 507-1084". – P. 623-630.
2. Steblyanko P.A. The schemes of abnormally high accuracy solution of nonstationary problems of theory of thermo-elastic-plasticity for plates and shells// The Fifth International Congress on Thermal Stresses and Related Topics. Vol.1 - Virginia Politechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, USA. - June 8-11,2003.-P. 231 -234.

3. Steblyanko P. Phenomenological Model of Pseudo-Elastic-Plastic Material Under Nonstationary Combining Loading / P.Steblyanko, Y.Chernyakov, A.Petrov, V.Loboda // Structural Integrity, Vol. 8, Theoretical, Applied and Experimental Mechanics, SpringerVerlag, 2019.- P. 205-208.

A SHEARED ACTION OF A RIGID STAMP TO THE QUASI-CRYSTALLINE HALF-SPACE

M. Altoumaimi, V. Loboda

Oles Honchar Dnipro National University

Quasicrystals, found by Shechtman et al. [1] are a new class of materials which are actively studied for about several last decades. Quasicrystals (QCs) differ from ordinary crystals and non-crystals by their high strength, high wear resistance, low heat-transfer, etc. These materials, are nowadays used in in coating surface of engines, solar cells, thermoelectric converters, containers of nuclear fuel, etc.

Because of the quasi-periodic symmetry of QCs, concepts of the high-dimensional space have been introduced instead of the classical crystallographic theory. The phonon field represents the lattice vibrations in QCs, and the phason field defines the quasi-periodic rearrangement of atoms. Both these fields are used to describe the elastic properties of QCs.

A contact problem for an absolutely rigid beam and semi-infinite one-dimensional (1D) quasi-crystalline space $x_2 \geq 0$ is considered. It is assumed that the beam is loaded by the force which acts to the beam in the shearing manner. For 1D quasi-crystalline material the atom arrangement is periodic in the $x_1 - x_2$ plane and quasi-periodic in the x_3 -axis.

The presentations of the phonon and phason stresses via derivatives of phonon and phason displacements can be written in the form:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{j3} \\ H_{j3} \end{Bmatrix} = \mathbf{R} \begin{Bmatrix} u_{3,j} \\ w_{3,j} \end{Bmatrix} \quad (j=1,2), \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_{44} & R_3 \\ R_3 & K_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

and c_{44}, K_2, R_3 stand for the phonon elastic modulus, phason elastic modulus and phonon-phason coupling modulus, respectively. They are written in the simplified index notation.

By means of the complex function approach the following presentations at the boundary of the half-plane are obtained:

$$u_1^-(x_1, 0) = \Phi'^-(x_1) + \Phi'^+(x_1), \quad (2)$$

$$t_2^-(x_1, 0) = B\Phi'^-(x_1) + \bar{B}\Phi'^+(x_1), \quad (3)$$

where $\mathbf{u} = [u_3, w_3]^T$, $\mathbf{t}_j = [\sigma_{3j}, H_{3j}]^T$, $\Phi'^{\pm}(x_1) = \lim_{x_2 \rightarrow 0} \Phi'(x_1 \pm ix_2)$, $B = iR$ and the vector-function $\Phi(z)$ is analytic in the whole plane except the lower edge of the punch.

Using the presentation (2), (3) the problem of linear relationship is formulated and solved under the additional condition of the beam equilibrium. Due to this solution the analytical formulas for determination of the phonon and phason stresses the along the stamp base as well as the derivative of the displacements along the other part of the half-space boundary are found.

1. Shechtman, D.; Blech, I.; Gratias, D.; Cahn J. W. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Physical Review Letters* 1984, 53 (20), 1951-1953.



Доповіді секції: Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті (17-19 вересня 2024)

1(77) Н.Ф.Стеблюк, Н.М.Волосова BUSINESS MODEL CANVAS В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ДІЯЛЬНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВ	172
2(78) I.I. Zhulkovska, O.O. Zhulkovskyi, H.Ya. Vokhmianin, A.E. Shevchenko MODERN CRYPTOGRAPHIC METHODS OF ENCRYPTION AND DATA PROTECTION	174
3(72) Т.В.Крилова РОЗВИТОК ОСВІТИ В УКРАЇНІ У XVI СТОЛІТТІ	176
4(71) Худа Ж.В., Тонконог Є.А. ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СУЧАСНОМУ НАВЧАННІ: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВ	177
5(59) O.M. Guz, O.P. Zhuk, O.M. Bagno ACOUSTOELASTICITY RELATIONS FOR THE ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR RESIDUAL STRESSES ESTIMATION IN SOLIDS	180
6(64) М. І. Музикін, С. І. Бібік, А. П. Бузова ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЛІТНОГО ПРОЕКТУ "ЄЧЕРГА" ПРИ ПЕРЕТИНІ КОРДОНУ З АНАЛОГІЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ КРАЇН ЄВРОПИ	180
7(97) O.P. Krukovskyi, G.I. Larionov, U.V. Zemlyana ON MATHEMATICAL MODEL CHOICE OF REBAR ANCHOR AND FIXED COMPOUND INTERACT PROCESS	182
8(98) Ю.В. Савченко, Д.І. Прокопович-Ткаченко, О.М. Сумовський ВИКЛИКИ ТА ПРОБЛЕМИ РОЗУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ІоТ НА ПРИКЛАДІ ВРАЗЛИВОСТІ РОЗУМНОЇ РОЗЕТКИ BELKIN	183
9(109) О. А. Дзюба, В. В. Гудзь ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ, РОЗТЯГНУТОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНКИ З ОТВОРОМ	185
10(99) О.З.Галішшин, П.О.Стеблянюк, В.М.Харченко ТЕРМОПРУЖНИЙ СТАН ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НОВОЇ ТЕХНІКИ, ВИГОТОВЛЕНИХ ПЕРЕХРЕСНОЮ НАМОТКОЮ	186
11(102) V.A. Maksymyuk, N.V. Maksymyuk ON THE DEW POINT CALCULATION ALGORITHM ON EXCEL	186
12(100) А. Г. Зеленський, С. О. Слободянюк, С. В. Шатов КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ І ЖИТЛОВИХ	

БУДИНКІВ ВІД РУЙНУВАНЬ, СПРИЧИНЕНИХ УДАРАМИ І ВИБУХАМИ	187
13(50) О.А. Дзюба ДОВГОВІЧНІСТЬ ПІДВІСНОГО ТРУБОПРОВОДУ ПРИ НЕРІВНОМІРНОЇ КОРОЗІЇ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	189
14(110) Р.В. Коба, В.А. Максимюк, В.С. Ушакова, О.В. Ушаков ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПОШУКИ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОДЯНОГО КУЛЕУЛОВЛЮВАЧА	190
15(107) А.П. Дзюба, П.А. Дзюба МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ШИРОКОМАСШТАБНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ	191
16(113) С.М. Стецюк, Я.В. Дорошенко, І.П. Шацький, А.С. Величкович ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ОЧИСНОГО ПОРШНЯ У ЗВУЖЕНІЙ ДІЛЯНЦІ ТРУБОПРОВОДУ	194
17(116) B.I. Terokhin, E.L. Hart ON THE INFLUENCE OF INCLUSION FROM A FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL ON THE STRESS CONCENTRATION IN A THIN PLATE WITH A SQUARE HOLE	196
18(117) Е. Л. Гарт, А. А. Сяєва КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ ПЛАСТИН З ТРИКУТНИМ ОТВОРОМ	196
19(122) В. Гнітько КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЩНОСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДОРОЗМОЛЬНИХ МЛІНІВ	198

BUSINESS MODEL CANVAS В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ДІЯЛЬНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВ

Н.Ф.Стеблюк ¹, Н.М.Волосова ²

¹Університет митної справи та фінансів

²Дніпровський державний технічний університет

Business Model Canvas – один із найпопулярніших інструментів для аналізу бізнесу. «Канва бізнес-моделі» (англ. business model canvas) —інструмент стратегічного управління, щоб викласти на папері бізнес-модель стартапу, проєкту та діючого підприємства, що відповідає пріоритетам споживачів і забезпечує зростання результативних показників.

У сьогоднішніх реаліях бізнес-модель — це боротьба за ринок та за частку, яку займатимете на цьому ринку досліджувана компанія і розмір цієї частки визначатиме конкурентна пропозиція. Правильно розроблена схема допомагає визначити перед собою повну модель бізнесу, провести аналіз і спрогнозувати можливі недоліки ще на етапі планування. Блоки, з яких складається схема, взаємопов'язані. У кожному містяться запитання, відповіді на які дають повне уявлення про ключові для конкретної бізнес-моделі параметри. В кожному блоці відображаються конкретні етапи планування.

Основними елементами бізнес-моделі є: продукт, система залучення та утримання клієнтів, організаційна структура та бізнес-процеси, фінансова модель, операційне управління та безпека бізнесу. Вся справа – у системності: на кожному етапі розвитку

компанії, залежно від її ідеї, ризиків, можливостей, диспозиції ринкових сил потрібно відповідний рівень системності.

Слід зазначити, що бізнес-модель представляє собою одночасно інструмент діагностики та побудову стратегії підприємства. Достовірно спрогнозувати успішність продукту не можна. Однак на етапі моделювання можна визначити потенційну реакцію споживачів на пропонований товар або послугу. Для цього враховують: переваги перед аналогами; неповторні характеристики, конструктивні особливості; пропоновану вартість; потенційну користь для покупця; собівартість.

Бізнес-модель компанії — це відповідь на запитання, що являє собою конкретний бізнес:

- що ми продаємо (які продукти)?
- кому ми продаємо (цільові сегменти клієнтів)?
- який альтернативний вибір мають клієнти (конкурентне оточення)?
- чому клієнт вибере купити саме у нас (конкурентна стратегія)?
- як ми просуваємо наші продукти на ринку (канали просування)?

Наводиться приклад побудови Business Model Canvas, яка допомагає проаналізувати переваги та недоліки підприємства (рис.1).

Отже, глибинне розуміння ринку та всіх його учасників — основа для кожного ефективного власника бізнесу. На його розумінні формується сильна конкурентоспроможна бізнес-модель із метою створення продукту (послуги) з високою цінністю.

Важливі партнери Хто ваші ключові партнери/постачальники?	Основні дії Які ключові кроки необхідні для реалізації ціннісної пропозиції та отримання прибутку?	Ключові цінності У чому цінність продукту для клієнта? Яку проблему ми допомагаємо вирішити нашим клієнтам, які потреби клієнтів ми задовольняємо?	Відносини з клієнтами Який тип відносин існує в кожному з наших сегментів клієнтів	Сегменти клієнтів Хто наші найважливіші клієнти?
- Постачальники сировини - Місцеві органи влади - Регуляторні органи - Виробники обладнання	- Оснащення приміщення (ремонт, встановлення обладнання) - Закупівля обладнання та меблів - Розробка меню (підбір меню): рецепти, стандарти. - Навчання персоналу - Приготування напоїв - Промоція, організація заходів	Цінність послуги — це задоволення і вигода, які отримує клієнт після покупки. Найбільш демократичний тип кав'ярні — стаціонарна або мобільна точка продажу, яка пропонує кілька сортів кави і	- Орієнтація на постійних клієнтів - Чітко визначена цільова аудиторія (студенти, бізнесмени, сімейні пари тощо) - Чітке позиціонування формату закладу - Клієнтоорієнтованість - Орієнтація на сервіс	- Дохід - середній і вище (в регіоні) - Вік - 16-60 років - Тип - молодь, студенти, сім'ї з дітьми та без дітей, офісні працівники

	Ключові ресурси Яких ключових ресурсів потребує ціннісна пропозиція? щоб бути прибутковою? - Складське обладнання - Персонал (4 бармени (працюють позмінно: 2 людини підмінюють інших двох), прибиральниця, менеджер, посудомийка (2 людини: 1 людина працює позмінно)) - Сировина.	додаткових напоїв на їх основі на винос.	Канали збуту Які канали ви плануєте використовувати для контакту з клієнтами - - Вулична реклама - листівки, флаєри - Реклама для цільових аудиторій - Соціальні мережі - Зворотній зв'язок з клієнтами	
Структура витрат • Оренда площі, комунальні послуги • Оплата праці Податки (єдиний податок, ЄСВ)	Потік доходів За яку цінність готові платити наші клієнти? Який внесок кожного джерела доходу в загальний прибуток? - Продаж напоїв та кондитерських виробів (середня маржа - 100%) - Оренда залу - Організація літнього майданчика - Продаж кави в зернах (маржа 20-80%)			

Рис.1 Приклад побудови бізнес-моделі кав'ярні на основі Business Model Canvas

MODERN CRYPTOGRAPHIC METHODS OF ENCRYPTION AND DATA PROTECTION

I.I. Zhulkovska¹, O.O. Zhulkovskyi², H.Ya. Vokhmianin², A.E. Shevchenko¹

¹*University of Customs and Finance, Dnipro,*

²*Dniprovsky State Technical University, Kamianske city*

Data volumes are constantly increasing in the modern world of the information society, making ensuring their security one of the main priorities. With the development of technologies and the increasing number of cyber threats, protecting confidential information becomes an essential component of any system. In this context, cryptography plays a key role in ensuring data security.

The relevance of this work is determined by several key factors. Firstly, it is the increasing amount of digital data and its importance for various fields of activity – from business and science to personal communications. With the increase in information volumes, the potential threat of unauthorized access to it also increases. Secondly, modern technologies provide new opportunities for hacking attacks and cybercrimes, emphasizing the need for constant improvement of data protection methods. Regular occurrences of data breaches and cyberattacks indicate the vulnerability of traditional encryption approaches, necessitating continuous exploration of new cryptographic methods. Thirdly, there is a threat to existing encryption methods due to the rapid development of quantum technologies. Researching new

cryptographic approaches is an important step in preventing potential threats and ensuring the resilience of data protection in the future.

The main objectives of the work are focused on safeguarding data confidentiality through the exploration of modern cryptographic encryption methods. Analyzing various approaches and their utilization in contemporary settings are crucial steps in developing effective strategies for ensuring information security in the digital environment. The work includes an analysis of the subject area and identifies tasks in the field of cryptography. Key aspects of this field are considered. An overview of the main encryption methods is presented, including symmetric and asymmetric encryption, their principles, and areas of application, with an emphasis on the role of keys in this process in the context of cryptography. The current state of cryptographic encryption methods is outlined, taking into account recent trends and advancements in this field.

Part of the work delves into hashing and digital signatures, pivotal for ensuring data integrity and sender authenticity. It also explores security protocols ensuring data protection during network interactions. Discussion extends to modern trends like quantum cryptography and homomorphic encryption, crucial for information security. Descriptions of software tools and libraries for implementing encryption mechanisms across programming languages, such as Python, Java, and JavaScript, are provided. Specific examples include cryptography in Python, OpenSSL, Libsodium, CryptoJS, and NaCl, facilitating secure cryptographic operations. The bcrypt algorithm for password hashing is elaborated, emphasizing characteristics such as slowness and the use of salt. This offers a comprehensive understanding of modern encryption methods, implementation tools, and underscores the importance of selecting reliable cryptographic tools for data security. Among the research tasks was the study of various encryption algorithms: symmetric AES (Advanced Encryption Standard), DES (Data Encryption Standard), 3DES, Blowfish, Twofish, and asymmetric RSA (Rivest-Shamir-Adleman) and ECC (Elliptic Curve Cryptography) with the aim of evaluating their efficiency, security, and applicability in different scenarios. JavaScript and Python were utilized for this task. Despite being among the oldest algorithms, RSA remains utilized for transmitting shared keys due to its suitability for encryption and decryption operations. However, its drawbacks include insufficient security and slowness, attributed to its involvement of complex mathematical operations. RSA finds utility in generating and verifying electronic signatures, prioritizing security and reliability over speed. Enhanced implementations like RSA-OAEP and RSASSA-PSS offer additional security measures against potential attacks. The DES algorithm operates on 64-bit blocks of data, resulting in 64-bit ciphertext. Its vulnerability to potent attacks has led to decreased popularity, with 3DES providing heightened security as a modified version. AES, functioning on 128-bit blocks and processing 16 bytes of input data at a time, demonstrated effectiveness in experiments, exhibiting significantly faster performance than DES on average, albeit requiring more computational resources. Blowfish proves sufficiently swift for real-time data encryption, while Twofish offers enhanced reliability. Research on RSA and ECC aims to deepen understanding of asymmetric encryption principles, while analysis of AES, Blowfish, Twofish, DES, and 3DES delves into symmetric ciphers, facilitating a deeper understanding of encryption principles and aiding in selecting the most suitable option based on specific security and efficiency requirements.

Further research in the field should focus on quantum cryptography, homomorphic encryption, and developing faster encryption algorithms. Enhancing protection against cybercrime and AI threats is crucial. Exploring possibilities of integrating cryptographic methods with other modern technologies such as artificial intelligence, blockchain, and the Internet of Things; continuous improvement of encryption standards and security protocols;

providing proper education and understanding of cryptographic principles among users, as well as implementing legal mechanisms to protect privacy and data security.

РОЗВИТОК ОСВІТИ В УКРАЇНІ У XVI СТОЛІТТІ

Т.В.Крилова

Дніпровський державний технічний університет

«Освіта – процес і результат засвоєння особистістю певної системи наук, знань, практичних умінь і навичок і пов'язаного з ними того чи іншого рівня розвитку її розумово-пізнавальної і творчої діяльності, а також морально-естетичної культури, які у своїй сукупності визначають соціальне обличчя та індивідуальну своєрідність цієї особистості.

Освіта є найширшою з педагогічних категорій, яка має цілісну, полі функціональну та полі смислову структуру» [1].

Освіта має три важливіші функції: людино творчу, технологічну та гуманістичну.

Ці функції поєднуються з функцією навчання – освітньою, розвивальною та виховною. Вони розглядаються в їх єдності та взаємозв'язку.

Поняття «освіта» має кілька аспектів, а саме; як процес (цілісна єдність навчання, виховання, розвитку, саморозвитку; збереження культурних норм з орієнтацією на майбутній стан культури; створення умов для повноцінної реалізації внутрішнього потенціалу індивіда і його становлення як інтегрованого члена суспільства, виконуючи функцію наступності поколінь).

З поняттям «освіта» пов'язані такі поняття як «самоосвіта», «самонавчання» і «самовиховання».

Зміст освіти та її рівень визначають вимоги виробництва та зумовлені соціальними відносинами, станом науки, техніки, культури та рівнем розвитку шкільної справи і педагогічної науки.

Зі змістом освіти тісно пов'язані методи навчання, що спрямовані на розв'язання певних навчально-виховних цілей.

У другій половині XVI сторіччя виникли зміни у державно-адміністративному положенні значної частини українських земель. Користуючись послабленням Великого князівства Литовського, яке приймало участь з 1558 року в багаторічній війні з Росією, керуючі кола Польщі взяли курс на захоплення всіх українських земель. Навесні 1569 року в склад Польського королівства були включені Волинське, Подляшське, Київське, Брацлавське воєводства. Польське королівство та Велике князівство Литовське об'єдналися в єдину державу – Річ Посполиту.

Річ Посполіта продовжувала війну з Росією.

Для зміцнення своїх громадсько-політичних та економічних позицій, українські феодали переходили у католицизм та ополячувалися. Одночасно польська влада при участі українських магнатів посилено проводила полонізацію, впроваджувала католицизм. Частина вищого православного духовенства згідно з Брестською унією 1596 року проголосила об'єднання Православної Церкви на території Речі Посполитої (до неї входила більша частина України та Білорусі) з католицькою під керівництвом Папи Римського. Польські магнати, шляхта і католицьке духовенство нехтували національними традиціями українського народу, гальмували розвиток української мови і культури. Це посилювало національне і релігійне гноблення та безправ'я народних мас.

Всупереч тому, що феодально-кріпосницьке і національно-релігійне гноблення були гальмом економічного і культурного розвитку українського народу, у другій половині XVI століття та особливо у третій половині XVII століття в Україні отримали подальший розвиток міста як центри ремесла і торгівлі, посилювались економічні зв'язки між окремими землями, виникали передумови для утворення єдиного внутрішнього, тобто національного ринка. Продовжувався процес розвитку української народності, зростала національна свідомість українського народу, розвивалася українська культура.

Для боротьби проти іноземного гноблення, національних і релігійних притискань міське населення і частково сільське у XVI – XVII століттях організувалися у братерства. Ці братерства відкривали школи, типографії, навколо яких об'єднувалися культурні сили. Наприкінці XVI – початку XVII століть братерські школи виникли у 1585 році у Львові, в 1615 році у Києві, в 1620 році у Луцьку, Вінниці, Немирові, Кам'янець-Подільському та в деяких інших містах. Викладання в цих навчальних закладах велося на рідній мові. Значна увага приділялася вивченню грецької, а пізніше латинської та польської мов, вивчалися граматики, риторика, а також арифметика, астрономія, музика та богослів'я.

У другій половині XVI століття розповсюдження освіти сприяло виникненню в Україні книгодрукарства. Перша типографія була відкрита Іваном Федоровим у Львові, де в 1574 році були видані «Апостол» і «Буквар». В 1578 році була заснована Острожська типографія, потім її обладнання перейшло до Львівської братської типографії. До середини XVII століття в Україні було 25 типографій у 17 містах і селах: в Києві – Києво-Печерська типографія, типографії Т. Вербицького та С. Соболя; у Львові – М.Слезки і Ф. Желиборського; Чернігівська типографія.

Львівське Успенське братерство було відомо тим, що продовжувало традиції Івана Федорова. Воно розгорнуло книгодрукарство і забезпечило розповсюдження книжок в Україні та за її кордонами. У 1585 році братерство заснувало школу, яка повинна була з часом перетворитися в навчальний заклад.

В 1632 році було створено перший вищий навчальний заклад в Україні – Києво-Могилянська колегія. Вона була створена шляхом об'єднання Київської братерської школи та Лаврської школи. В школі навчалися переважно діти української шляхти, старшин, духовенства, багатих міщан і козаків. Братерські школи зіграли прогресивну роль в розповсюдженні освіти і розвитку української культури.

1. Енциклопедія освіти / Акад. пед. наук України; головний редактор В.І. Кремінь. – К.: Юрінком Інтер, 2008. – 1040 с.

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СУЧАСНОМУ НАВЧАННІ: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Худа Ж.В., Тонконог Є.А.

Дніпровський державний технічний університет

В останні роки хмарні технології стали неодмінною частиною сучасного цифрового середовища. Вони відіграють значну роль у багатьох галузях, включаючи освіту. Хмарні сервіси надають універсальний доступ до даних та додатків з будь-якого пристрою, що робить їх особливо привабливими для навчальних цілей. В даній роботі

автори дослідили різноманітні способи використання хмарних технологій у навчальних закладах, а також проаналізували переваги та виклики, з якими вони можуть стикатися.

Використання хмарних технологій у сфері навчання має значний потенціал для поліпшення доступності, ефективності і результативності навчання. Ось деякі приклади, які демонструють, як хмарні технології можуть бути використані в навчальних цілях:

— Зберігання та обмін даними: Сервіси хмарного зберігання дозволяють учням, викладачам та навчальним закладам зберігати, обмінюватися та спільно працювати над документами, презентаціями, відео та іншими матеріалами, що спрощує спільну роботу та доступ до неї з будь-якого пристрою з підключенням до Інтернету.

— Дистанційне навчання: Платформи для віддаленого навчання, які працюють на хмарних технологіях, дозволяють викладачам створювати інтерактивні курси, завдання та тести, а учням - вивчати матеріали, спілкуватися та взаємодіяти з викладачами з будь-якого місця.

— Адаптивне навчання: Хмарні технології можуть використовувати аналіз даних та штучний інтелект для створення персоналізованих навчальних програм, які відповідають індивідуальним особливостям кожного учня. Хмарні платформи можуть застосовувати дані про навчальний прогрес студентів для створення індивідуальних навчальних програм та рекомендацій, що відповідають їхнім потребам та інтересам.

— Спільна робота та проектна діяльність: За допомогою хмарних інструментів, таких як Google Документи або Microsoft Office 365, учні можуть спільно працювати над проектами, ділитися думками та ідеями в реальному часі.

— Доступ до ресурсів: Багато навчальних матеріалів, таких як електронні книги, відеоуроки та онлайн-курси, можна зберігати в хмарних сховищах та мати до них доступ з будь-якого пристрою.

— Моніторинг та оцінювання: Системи хмарних технологій можуть спрощувати процеси оцінювання та моніторингу процесу навчання студентів за допомогою електронних засобів, проводити онлайн-тести, що дозволяє ефективніше аналізувати успішність навчання. Системи хмарних технологій дозволяють викладачам ефективно відстежувати прогрес студентів.

Розглянемо основні аспекти хмарних технологій. Platform as a Service (PaaS) є одним з трьох основних моделей хмарних технологій, разом з IaaS (Infrastructure as a Service) та SaaS (Software as a Service) PaaS надає середовище для розробки, тестування та розгортання програмного забезпечення без необхідності управління інфраструктурою, що знаходиться в тилу хмари. Ось деякі ключові аспекти PaaS в хмарних технологіях: PaaS надає інструменти та середовища для розробки програмного забезпечення, такі як мови програмування, фреймворки, бази даних тощо. Розробники можуть створювати, тестувати та вдосконалювати свої програми без необхідності встановлення та налаштування інфраструктури. PaaS автоматизує процес розгортання програмного забезпечення, що дозволяє розробникам швидко виводити нові версії свого програмного забезпечення на ринок. Один з важливих аспектів PaaS полягає у здатності автоматично масштабувати ресурси в залежності від потреб програми. Це дозволяє забезпечити високу доступність та продуктивність програми. Використання PaaS дозволяє уникнути зайвого витрачання ресурсів, оскільки інфраструктура підтримується провайдером хмарних послуг, а клієнт сплачує лише за використані ресурси.

Загалом, PaaS в хмарних технологіях надає розробникам зручне та ефективне середовище для створення та розгортання програмного забезпечення, спрощуючи процес розробки та забезпечуючи більшу гнучкість та масштабованість.

Слід відзначити деякі переваги хмарних сервісів. Вони можуть допомогти університетам скоротити витрати та прискорити використання нових технологій для

задоволення мінливих освітніх потреб. Студенти можуть безкоштовно використовувати офісні програми без необхідності купувати та встановлювати їх та підтримувати ці програми в актуальному стані на своїх комп'ютерах. Це не тільки дозволить учням використовувати онлайн-навчальні матеріали під час занять, але й допоможе отримати доступ до цих матеріалів вдома, використовуючи їх для підготовки та повторення пройденого матеріалу. Доступність послуг є найбільш важливою та бажаною для користувача, який здобуває освіту.

Поряд із перевагами використання хмарних технологій існують деякі недоліки. Найважливіший із них - це проблеми з безпекою, які стають особливо важливими у зв'язку зі збереженням та обробкою конфіденційної інформації в хмарних середовищах. Ось деякі з найбільш поширених проблем безпеки у хмарних технологіях:

- Доступ до даних: Існує ризик несанкціонованого доступу до даних через недостатньо захищені облікові записи, недоліки в управлінні доступом або вразливості в програмному забезпеченні хмарних платформ.

- Збереження даних: Питання щодо захищеності даних можуть виникати внаслідок недостатнього шифрування, недостатньої фізичної безпеки серверів або недбалого оброблення даних в хмарних центрах обробки даних.

- Атаки з боку зовнішніх зловмисників: Хмарні сервіси можуть бути предметом цільових кібератак, таких як DDoS атаки, фішингові атаки або витік даних, що може призвести до порушення безпеки даних.

- Зберігання та обробка інформації профілю користувача: Деякі хмарні сервіси можуть зберігати і обробляти велику кількість інформації про користувачів, що може створювати проблеми з приватністю та безпекою особистих даних.

- Відмови в обслуговуванні та недоступність сервісів: Недоступність хмарних сервісів через технічні проблеми або кібератаки може призвести до втрати доступу до важливих даних та послуг.

Для забезпечення безпеки при використанні хмарних технологій важливо вживати відповідні заходи захисту даних, включаючи шифрування, міцні методи автентифікації та авторизації, регулярне оновлення програмного забезпечення, моніторинг подій та вчасну реакцію на потенційні загрози. Також важливо враховувати вимоги регулятивних стандартів щодо захисту даних.

Іншою проблемою безпеки є небажана реклама. Не передбачено, який контент буде запропонований користувачеві, особливо якщо це стосується освітніх закладів.

Але, не зважаючи на деякі проблеми, в цілому, хмарні технології в навчанні створюють нові можливості для покращення якості освіти, забезпечуючи більш гнучкий та доступний навчальний процес для всіх учасників. Використання хмарних технологій у навчанні відкриває нові можливості для поліпшення освітнього процесу. Практичне впровадження хмарних інструментів у навчальну практику може допомогти підвищити доступність, ефективність та результативність навчання для всіх учасників освітнього процесу. Додаткові дослідження та розвиток технологій у цій сфері можуть сприяти подальшому розвитку освіти в цифрову епоху.

NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR RESIDUAL STRESSES ESTIMATION IN SOLIDS

O. M. Guz, O.P. Zhuk, O.M. Bagno

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine

A review and critical analysis of existing methods for determining residual stresses in materials and structural elements of various technologies were carried out. It has been established that the modern and most effective method for determining the residual stresses in materials and structural elements is the ultrasonic nondestructive method, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute and Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Making use of the three-dimensional linearized theory of elastic wave propagation in solids with initial stresses, the acoustoelasticity equations are presented. The equations form the physical and theoretical basis of the method developed. It is shown that, in contrast to existing methods capable of determination of uniaxial stresses only, the proposed method allows one to estimate the one-, two- and three-axial stress state in isotropic and quasi-isotropic materials, as well as one- and two-axial stresses in the near-the-surface layers of materials and massive structural elements.

ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІЛОТНОГО ПРОЕКТУ "ЄЧЕРГА" ПРИ ПЕРЕТИНІ КОРДОНУ З АНАЛОГІЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ КРАЇН ЄВРОПИ

Музикін М. І.¹, Бібік С. І.², Бузова А. П.¹

¹*Університет митної справи та фінансів*

²*Державний університет інфраструктури та технологій*

Автомобільний транспорт є одним з найвигідніших та найбільш розповсюдженим у міжнародних перевезеннях. Це обумовлено такими факторами як: перевезення вантажу у потрібну точку країни та за конкретною адресою, варіативність шляхів доставки; поставки різних обсягів товару, а також різноманітні види спеціалізованих вантажних автомобілів практично під всі види вантажу.

Міжнародні перевезення відіграють одну з головних ролей у розвитку міжнародних економічних відносин. Вони забезпечують переміщення товарів, людей та інформації між різними країнами, що сприяє розвитку торгівлі, інвестицій, туризму та культурним обмінам міжнародних партнерів. Такі перевезення мають багато переваг. Але з перевагами є й недоліки. Що ж, одним з таких недоліків є довгий час очікування автомобілів під час перетину кордону. З цією проблемою стикалося багато країн, тому розглянемо декілька технологій, які допомагають уникнути заторів на кордоні.

На даний момент, через скрутне становище в Україні, люди щодня стикаються з проблемою перетину кордонів: з метою еміграції, роботи, відпустки, з іншої сторони прямує великий потік гуманітарної допомоги, і тих людей, хто повертається додому. Люди можуть знаходитись на кордоні великий проміжок часу, який може сягати до 24 год. Тому, Міністерством розвитку громад, територій та інфраструктури у співпраці з Міністерством цифрової трансформації, Державною службою з безпеки на транспорті, Державним агентством відновлення та розвитку інфраструктури, Державною митною службою та Державною прикордонною службою було створено проект - "Електронна

черга перетину кордону” або “єЧерга” з метою поліпшення ситуації щодо довгих черг на державному кордоні.

Отже, «єЧерга» – це безкоштовний сервіс, у якому перевізники можуть стати в чергу та прослідкувати за тим, як вона рухається в режимі онлайн. Єдине, що потрібно зробити водію, щоб потрапити до черги – це зареєструватися. Це може бути зроблено за допомогою мобільного додатка, веб-сайту або інших електронних каналів. Під час реєстрації, система надає інформацію про доступні години та локації, де особа може вибрати зручний для себе слот-тайм та місце для перетину кордону. Після реєстрації вона отримує електронний талон або квиток, який підтверджує її місце в черзі та час прибуття. На кордоні, особа пред'являє свій електронний талон контролеру. Завдяки камерам сканування номерних знаків, які встановлені на кожному прикордонному пункті, з якими працює проект, а станом на кінець 2023 р. їх кількість становила 16, відслідковується кожна машина, яка проїхала. Таким чином особа може відстежувати свою позицію в черзі в режимі реального часу. Вона буде отримувати оновлення про очікуваний час прибуття до кордону.

Але попри це, все одно проект не вирішує проблему існування самої черги, а лише упорядковує її. Проте таким чином, водії мають змогу планувати день і час прибуття до пропускного пункту, оскільки мають змогу прослідкувати, у який період часу їм треба під'їхати та перетнути кордон. Також це дає змогу оптимізувати час, витрачений на перебування в черзі та скоротити витрати часу на транспортування товарів.

Розглянемо також технології, які використовуються у країнах Європи для зменшення простою у чергах на кордоні.

Однією з таких технологій є TIR-EPD. На даний момент, TIR-EPD працює в 15 країнах: Бельгії, Болгарії, Чехії, Естонії, Фінляндії, Франції, Німеччині, Угорщині, Латвії, Литві, Молдові, Польщі, Румунії, Словаччині та Словенії. TIR-EPD – це безпечна інтеграція невеликого програмного модуля у відповідну інформаційну систему митниці для автоматичного обміну електронною інформацією про процедури між МДП та митним органом. Національні асоціації надають своїм перевізникам – власникам книжок МДП доступ до програми безкоштовно, присвоївши їм персональний логін і пароль. Після цього зареєстровані перевізники можуть самостійно створювати власну мережу користувачів програми з метою попереднього декларування своїх книжок. TIR-EPD – це процедура митного оформлення товарів, де заздалегідь надається митним органам повна інформація про вантаж і яка здійснюється за допомогою інтернет, тобто відстань між декларантом і митним інспектором не має значення. Завдяки попередньому електронному декларуванню, декларант має можливість працювати з декількома митними точками. Завдяки створеному сервісу, митні органи впевнені, що інформація надходить від авторизованого перевізника, вони можуть заздалегідь провести аналіз ризиків, будучи впевненими в дійсності книжки МДП перевізника через базу МСАТ "Cute-Wise" та бачити вже заздалегідь точну та достовірну інформацію про вантаж який перевозиться. За допомогою цього значно скорочується час митного оформлення, що відповідно знижує час простою у заторах на кордоні.

Також, у країнах Європи користується попитом така технологія, як радіочастотна ідентифікація або RFID (англ. Radio frequency identification). RFID-міткою називають мініатюрний запам'ятовуючий пристрій. В його основі лежить мікросхем, який зберігає унікальні інформаційні дані та номер, а також антена, яка відповідає за передачу та отримання даних. Ця мітка може працювати від джерела живлення, таким чином бути активною, але в більшості випадків данні прилади не потребують живлення. Цей метод вже став основою побудови сучасних безконтактних

інформаційних систем. На кордоні та на митницях за допомогою радіочастотних сигналів розміщені зчитувачі RFID здійснюють зв'язок з RFID-мітками. Зчитувач «читає» інформацію з мітки та ідентифікує цей об'єкт. Інформація, зчитана з RFID-міток, надсилається до комп'ютерної системи, яка автоматично обробляє ці дані. Це дозволяє швидко та точно ідентифікувати товар. А головне, це відбувається без необхідного ручного введення даних. Спеціальні мітки можуть бути зчитані з відстані, що дозволяє зберегти фізичний контакт з об'єктами. Також це дозволяє швидше та ефективніше обробляти велику кількість товарів. Інформація, зчитана з RFID-міток, надсилається до комп'ютерної системи, яка автоматично обробляє ці дані. В разі необхідності можуть бути проведені додаткові перевірки. Такий вид технологій вже використовується на кордонах таких країн, як Німеччина, Франція, Іспанія, Італія та Греція.

Отже, розглянувши три види технологій для скорочення затворів на кордоні, можемо прийти висновку, що всі вони різні за своїми властивостями одна від одної, але вони мають спільну мету – скорочення черг при перетині кордонів. На нашу думку, доцільним рішенням цього питання в напрямку підвищення ефективності роботи автомобільних пунктів пропуску є інтеграція цих технологій, які б працювали злагоджено та доповнювали одне одного в єдиній інформаційно-керуючій системі. Повністю інтегрована та автоматизована інтелектуальна система контрольно-пропускних пунктів у разі скоротить час на оформлення документів, витрати на фізичну перевірку та зменшить їх загальну кількість.

ON MATHEMATICAL MODEL CHOICE OF REBAR ANCHOR AND FIXED COMPOUND INTERACT PROCESS

O.P. Krukovskyi, G.I. Larionov, U.V. Zemlyana

Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

Anchoring of underground structures is becoming an increasingly common and modern type of support. This is due to the low cost and low metal consumption. Modern methods for calculating anchoring systems are based on the widespread use of modelling techniques. Mathematical modelling (MM) stands out among them due to its convenience and accessibility, thanks to the widespread use of computer systems. However, the main component of MM is the choice of a mathematical model. Numerical methods based on the finite element method (FEM) are the most widely used. The well-developed interface of modern packages of FEM-based methods contributes to their widespread use. However, the analysis of the obtained numerical data has its own peculiarities. For example, graphical representation of the dependence of the stress-strain state parameters in the vicinity of the workings on the structural parameters of the support is limited to two- and three-dimensional images. The visibility of such images allows them to be used for recommendations and conclusions regarding support designs. Since the set of such parameters can be significant, the procedure for analysing the importance of their influence on the stress-strain state in the vicinity of the supported face is not simple. What if we could find a simpler MM that would allow us to obtain solutions not by numerical procedures, but in the form of analytical formulas.

It turned out that the generalized problem of M.E. Zhukovsky not only corresponds to the processes and conditions of operation of a metal-polymer anchor fixed in rock, but also allows obtaining an analytical connection between the parameters of the stressed deformed

state and its design parameters. The assumption underlying this problem and having an analytical solution is that the interaction of a metal-polymer anchor with rock is similar to the interaction of an anchor through an intermediate sleeve with the environment. Modification of this model to meet the needs of mathematical modelling and calculation of the support of a mine workings with metal-polymer anchors allowed it to be successfully used for practical purposes.

However, a detailed study of the model revealed the need to take into account the peculiarities of interaction at the contacts in the system "anchor rebar - fixing compound - rock". Until now, tensile displacements at these contacts have been taken as proportionality coefficients in the expressions of displacements from forces acting on the fixing mixture both from helical protrusions on the anchor rebar and at the contact with the rock. However, an in-depth analysis of the interaction of the fixing mixture with the anchor rebar made it possible to take into account a more complex mechanism for their determination. The reasons for this decision were based on the analysis of the displacements that the anchor rebar received when it was pulled out of the rock mass. According to the experiments, the displacements were much greater than the elastic displacements.

Therefore, taking into account the insignificant thickness of the fixing compound layer, it is proposed to take into account not only the elastic deformation process due to the action of tensile forces and shear forces, but also to take into account viscoelastic processes occurring during the deformation of the high molecular weight material of the fixing compound to determine the contact interaction coefficients.

Comparison of the results of the distribution of interaction forces in the system "anchor rebar - fixing compound - rock" obtained by the proposed model and those obtained by the FEM method showed a slight difference in the results, which allowed us to conclude that the approach was correct.

ВИКЛИКИ ТА ПРОБЛЕМИ РОЗУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ІoT НА ПРИКЛАДІ ВРАЗЛИВОСТІ РОЗУМНОЇ РОЗЕТКИ BELKIN

Ю.В. Савченко, Д.І. Прокопович-Ткаченко, О.М. Сумовський

Університет митної справи та фінансів

Останнім часом кіберзлодії виявляють нові вразливості програмного забезпечення та напрямки атак, щоб скористатися ними. Фахівці з кібербезпеки ведуть постійну боротьбу, щоб бути в курсі останніх загроз. Обмін знаннями, який іноді називають обміном інтелектуальними даними, може підвищити колективну стійкість і здатність реагувати на небезпеки, якщо однолітки готові активно ділитися інформацією [1].

Інтернет речей (IoT) — це слово, яке об'єднує майже всі технології, що стосуються обчислень і зв'язку. Перш ніж ціль IoT може бути повністю реалізована, необхідно усунути деякі бар'єри, серед яких безпека та конфіденційність є двома з найважливіших. Коли пристрої IoT підключаються до шлюзу IoT або іншого крайнього пристрою, дані датчиків, які вони збирають, передаються в хмару для аналізу або обробляються локально. На основі отриманої інформації вони діють, і це може викрити пристрій, а також його дані.

Поширеними проблемами є недостатня або відсутність аутентифікації та авторизації пристрою, а також погане шифрування або його відсутність. Через обмежені джерела енергії та низьку потужність обробки безпека та конфіденційність IoT є складними, особливо для пристроїв з обмеженими ресурсами [2].

Дослідники з компанії Sternum опублікували цікаву історію про те, як їм вдалося виявити вразливість у розумних розетках Belkin Wemo. При дотриманні низки умов вразливість дозволяє виконати довільний код на пристрої та отримати контроль над ним, включаючи можливість віддаленого доступу [3].

Фізично пристрій складається з двох плат: високовольтної та керуючої. На керуючій платі розташовані SoC від Mediatek, модуль пам'яті об'ємом 512 мегабайт і ПЗУ об'ємом 128 мегабайт. У першому етапі дослідники здійснили копіювання прошивки пристрою з ПЗУ і її подальший аналіз. Виявлено, що розумна розетка працює на базі дистрибутиву OpenWRT, який є вільно розповсюдженим.

На платі дослідники виявили і послідовний інтерфейс, через який можна керувати пристроєм. Дослідники також виявили послідовний інтерфейс на керуючій платі, за допомогою якого можна керувати пристроєм. Хоча зламати пароль суперкористувача не вдалося, вони змогли перезавантажити пристрій у "режим відновлення", де вони легко змінили пароль root. В результаті всіх цих дій дослідники змогли встановити на пристрій налагоджувальне програмне забезпечення для подальшого аналізу.

Під час досліджень виявилася основна вразливість, пов'язана з фірмовим додатком для віддаленого керування розумною розеткою. У цьому додатку можна призначити унікальні імена для кожної розетки, але є обмеження, згідно з яким ім'я не повинно перевищувати 30 символів, і не дозволяється використовувати спецсимволи. Виявилось, що ці обмеження не перевіряються на самому пристрої, але лише на рівні програми додатку. Використовуючи вільно розповсюджену утиліту ruWeMo, дослідники змогли призначити розетці імена довільної довжини. За допомогою достатньо довгих рядків імені, керуючий додаток в середовищі OpenWRT почав втрачати стабільність, а простіше сказати "падати" [4].

Після аналізу оперативної пам'яті "підірваного" пристрою дослідники знайшли фрагменти "довгих імен" у незвичайних місцях, до яких користувач не мав доступу. Виявилось, що на кастомне ім'я розетки виділялося 68 байт, і перевірка введення не здійснювалась на самому пристрої. Це призводило до переповнення буфера при спробі запису особливо довгого рядка.

Через діючу систему Address Space Layout Randomization (ASLR) зайві дані записувалися в різні області пам'яті. Для подальшого вивчення прошивки ASLR довелося вимкнути. В результаті ще пари експериментів дослідникам вдалося виконати довільну команду (наприклад, для завантаження за певною адресою потенційно шкідливого коду та його запуску), передану у складі «унікального імені» для розумного пристрою. Разом з такою командою передаються і дані, що забезпечують її виконання шляхом перезапису за певними адресами оперативної пам'яті.

Вразливість набула ідентифікатор CVE-2023-27217. У наведеному методі атаки є кілька обмежень. Навіть із вимкненою системою ASLR потенційний експлойт має зробити кілька «спроб» атаки. Кожна невдала спроба призведе до падіння програми та її перезавантаження - таким чином пристрій виявляється поза доступом приблизно на 10 секунд. Ймовірно також атака можлива не тільки в локальній мережі, але і через хмарний сервіс. [5]

ВИСНОВКИ

Рекомендації для захисту від подібних атак завжди приблизно однакові:

- не робити пристрої доступними з Інтернету;

- не забувати змінювати стандартні паролі доступу, якщо вони є;
- якщо такі розетки використовуються в корпоративному оточенні — ізолювати їх від основної мережі.

Список використаних джерел

1. Бурячок В. Л., Гулак Г. М., Толубко В. Б. Інформаційний та кіберпростори: проблеми безпеки, методи та засоби боротьби: підручник. Київ: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2015. 449 с.
2. Інформаційна безпека держави: навч. посіб. для студ. спец. 6.170103 «Управління інформаційною безпекою», 125 «Кібербезпека» / В.І. Гур'єв, Д.Б. Мехед, Ю.М. Ткач, І.В. Фірсова. Ніжин: ФОП Лук'яненко В.В. ТПК «Орхідея», 2018. 166 с.
3. Serper A. «'FriendlyName' Buffer Overflow Vulnerability in Wemo Smart Plug V2» Sternum Magazine: веб-сайт. URL: <https://sternumiot.com/iot-blog/mini-smart-plug-v2-vulnerability-buffer-overflow/>
4. Chapple M. «Security, Privacy and Confidentiality: What's the Difference?» EdTech Magazine: веб-сайт. URL: <https://edtechmagazine.com/higher/article/2019/10/security-privacy-and-confidentiality-whats-difference>
5. The Internet of Things in the Cybercrime Underground / [H. Stephen, K. Vladimir, M. Fernando та ін.]. 2019.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ, РОЗТЯГНУТОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНКИ З ОТВОРОМ

О. А. Дзюба, В. В. Гудзь

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Сучасні прикладні пакети скінченно-елементного аналізу надають широкі можливості для використання всього спектру засобів цього ефективного підходу. Це, зокрема, використання різної кількості, розмірів та типів скінчених елементів, згущення сітки в околі високих градієнтів зміни напружено-деформованого стану, а також вибору крайових умов, зокрема, умов взаємодії з іншими підконструкціями, врахування зовнішніх впливів та ін.

В поданій роботі приведені результати числового експерименту дослідження особливостей впливу вибору крайових умов та кількості скінчених елементів на результати розрахунку розтягнутої в своїй площині прямокутної пластини з довільно розташованим прямокутним отвором.

Проведено скінченно-елементний порівняльний аналіз розрахунку такої затиснутої по одній із кромки пластинки з довільно розташованим прямокутним отвором (люком), як фрагменту панелі міжступеневого відсіку ракети-носія. При цьому на протилежній кромці (при вільних бокових) цієї пластинки були прикладені:

а) рівномірно розподілені напруження від насадженої маси вище розташованих конструктивних елементів;

б) рівномірні по довжині кромки переміщення від жорсткого з'єднувального шпангоута вище розташованого відсіку.

Розрахунки для цих двох варіантів крайових умов, за відповідного узгодження величин рівномірного напруження для задачі а) та рівномірного переміщення для

задачі б), були проведені за різним по ширині пластинки розташуванням прямокутного отвору та кількості скінчених елементів.

Продемонстровано відмінність отримуваних значень та розподілу напружень в пластині для зазначених вище різних крайових умов однієї і тієї ж задачі за різної кількості скінчених елементів та різного розташування прямокутного отвору.

Наведені результати демонструють, що навіть за використання ефективних засобів розрахунку можливе отримання різних, в тому числі і помилкових, результатів.

Матеріали дослідження подані у вигляді картин розподілу напружень для різних варіантів розрахунку.

DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR CALCULATING THE THERMAL ELASTIC STATE OF SHELL ELEMENTS OF MISSILE TECHNOLOGY MADE BY CROSSWINDING

O.Z.Galishin¹, P.O.Steblyanko¹, V.M.Kharchenko²

¹The S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS U,

²Design office "Yuzhnoe", Dnipro, Ukraine

The report proposes a method for determining the thermoelastic stress-strain state of layered shell elements of rocket technology made by cross winding. It is based on the hypotheses of a rectilinear element for the entire package of layers and the thermoelasticity ratio of an anisotropic material that has one plane of elastic symmetry. The solution of the problem is reduced to the numerical integration of the system of ordinary differential equations.

ON THE DEW POINT CALCULATION ALGORITHM ON EXCEL

V.A. Maksymyuk. N.V. Maksymyuk

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of the Ukraine

Dew point is an important characteristic in a construction, navigation, life activities, etc. There is no a simple explicit formula that would accurately express the dew point temperature due to relative humidity and actual temperature. The basis for calculating the dew point is a formula that determines the partial pressure of saturated water vapor depending on the temperature. The World Meteorological Organization recommended using the so-called Hoff's psychrometric formula. The transcendental equation for determining the dew point for a given actual temperature and relative humidity was obtained by the following procedure. Hoff's formula was written twice for the actual temperature and for the dew point temperature. The definition of relative humidity was logarithmized. Next, the algebraic part relative to the unknown is highlighted in the equation. Then a recurrent formula is built. The algorithm is implemented by the simple iteration method on Excel.

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ І ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ВІД РУЙНУВАНЬ, СПРИЧИНЕНИХ УДАРАМИ І ВИБУХАМИ

А. Г. Зеленський, С. О. Слободянюк, С. В. Шатов

*Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
м. Дніпро, Україна*

На сьогоднішній день, в час воєнного положення, коли Україна зазнає постійних ракетних ударів і ударів БПЛА, наслідками яких є руйнування будівельних споруд і жертви серед мирного населення [1], перед Україною стоїть проблема захисту і безпеки громадян, житлових будинків і споруд. Вона безпосередньо пов'язана з міцністю, жорсткістю вказаних об'єктів і логістикою проектування та будівництва.

Надамо концептуально вирішення цієї проблеми.

Аналізуючи наслідки руйнувань споруд і житлових будинків [1], можна стверджувати нагальну потребу проектування і побудови житлових будинків на основі очевидного нового підходу, який полягає в першу чергу, в необхідності проектування і будівництва достатньо міцних стін і перекриттів. Більше того, на основі аналізу ступеня руйнувань від відповідних типів ракет і шахедів можна з достатньою точністю прогнозувати міцність і ступінь захисту споруд при зміцненні стін і плит перекриттів.

Перша проблема – захист від руйнування стін і, як показує аналіз, всієї споруди.

Це можна досягти збільшенням товщини зовнішніх стін приблизно до 80-100 см., причому стіни повинні бути залізобетонними. Більш точні результати можна отримати, використовуючи теорію [2], яка враховує властивості залізобетону, зокрема його повзучість. Такі стіни з високою надійністю в разі зменшать кількість жертв і об'єми руйнувань від тих ракет, які при попаданні їх у землю утворюють воронки розмірами 6-7 метрів. Більш того, опираючись на аналіз реальних руйнувань, можна з великою ймовірністю прогнозувати, що руйнування не будуть глобальними, а будуть певними локальними не наскрізними руйнуваннями стін в місці ракетного удару. Руйнування таких міцних і товстих залізобетонних стін від шахедів взагалі можна виключити. Внутрішні несучі стіни можна проектувати і будувати згідно з відомими нормами. При проектуванні повинно бути заплановано в кожній квартирі кімната-укриття. Стіни цього міні укриття повинні бути несучими порядку 40 см товщини. Основним фактором міцності такого міні укриття повинно бути перекриття його і двох сусідніх кімнат суцільними плитами. Це підвищить його міцність за рахунок посилення жорсткості цього будівельного вузла. Розміри в плані такого міні укриття можуть бути порядку 2 м на 5 м.

Зменшенню сили ударів сприятиме і орієнтація стін будівлі. Житловий будинок повинен бути зорієнтованим так, щоб дві сусідні стіни будівлі “дивилися” на південний схід і південний захід, і тоді удари зі сходу і півдня будуть зменшені приблизно в 1,41 раз. Одна з цих стін може бути “глухою”. Вікна повинні захищатися від прямого попадання ракети чи шахеда суцільною залізобетонною товстою неширокою стіною (близько 1,5 м) під кутом близько 45 градусів до фасаду зверху донизу по всій висоті споруди. Така стіна мало зменшить освітленість у приміщеннях, але посилить захист споруди.

Друга проблема – захист від руйнування перекриттів житлових споруд.

Це можна досягти збільшенням товщини залізобетонних плит перекриття верхнього технічного поверху (до 60-80 см) і одного-двох перекриттів верхніх житлових поверхів приблизно до 50-60 см. Більш точні результати для конкретних

геометричних розмірів споруди можна отримати, використовуючи варіанти математичної теорії для лінійно пружних і нелінійно пружних матеріалів плит [3, 4]. Вказані плити перекриття не повинні містити в перерізах послаблень типу наскрізних отворів у середній частині перерізів. Ці плити повинні бути виготовлені з монолітного залізобетону. Плити перекриття інших, нижчих поверхів житлових споруд можуть залишатися класичних розмірів, але з меншою часткою послаблень (отворів) у середній частині перерізу. Перекриття технічного і верхніх поверхів будуть набагато міцнішими, якщо використовувати арочні (викривлені) плити. Бетон для стін і плит перекриття усіх поверхів має бути високої марки. Під новими побудованими спорудами повинні міститися міцні укриття.

Орієнтовна відносна вартість проектування і будівництва таких житлових будівель у порівнянні зі звичайними.

При оцінці вказаної відносної вартості приймемо вартість житлового будинку, спроектованого і побудованого згідно зі старих норм, за 100 %. У випадку його руйнування від вказаних вище ракетних ударів він буде практично не життєздатним, не підлягатиме капітальному ремонту, і, головне, що неприпустимо, будуть людські жертви.

Для відновлення споруди потрібно буде насамперед провести операцію по порятунку людей, розчистити завали, вивезти будівельне сміття, демонтувати споруду повністю, або ж майже повністю, і потім фактично побудувати знову такий же житловий будинок. Всі додаткові затрати на перебудову-побудову такого ж самого будинку будуть апіорі не меншими 100 %. Тобто, проектування і будівництво (подвійне) будинку за старими нормами міцності обійдеться не менше 200 % вартості. І при цьому, що найбільш неприйнятно, проживання в такому будинку буде знову великим ризиком для життя.

Вартість житлового будинку, спроектованого і побудованого за вказаним вище новим підходом без використання старих норм, ураховуючи частку додаткових матеріалів, робіт і інше, буде приблизно на 50 % - 60 % вища, ніж його вартість за старими нормами, тобто вартість складе 150 % - 160 %. У додаткову вартість 50 % - 60 % увійдуть проектування і зведення укриття, зовнішніх стін збільшеної товщини, перекриттів технічного і верхнього поверхів, зовнішніх захисних стін для вікон, кімнат-укриттів, збільшення розмірів фундаменту за рахунок збільшення ваги споруди. Економія складе близько 40 % - 50 % від початкової вартості. І головне: такий житловий будинок буде надійним для мешканців з мінімальними ризиками для їх життя та з високою ймовірністю залишитися не зруйнованим, отримавши тільки локальні місцеві руйнування, які з високою ймовірністю не зможуть призвести до людських жертв.

Висновок. Підвищення міцності і жорсткості будівельних споруд призведе у воєнний час до збереження людського життя, захисту і безпеки споруд, і в остаточному результаті – до економії ресурсів, зменшення їх вартості та збільшення надійності.

Література

1. Богаченко С. В., Шатов С. В., Рудін А. А. Діагностика технічного стану будівельних конструкцій, які зазнали непроектованих впливів вибухового характеру. *Український журнал будівництва та архітектури. Науково-практичний журнал. 2023. № 2 (014). С. 100-107.*
2. Слободянюк С. О., Яценко Є. А. Монографія. Взаємодія попередньо-напруженої арматури з бетоном і розрахунок одношарових стінових панелей з урахуванням повзучості поризованого бетону. Дніпропетровськ: ПДАБА, Пороги, 2007. 280 с.
3. Зеленський А. Г. Монографія. Варіант математичної теорії трансверсально-ізотропних пластин довільної товщини. Дніпро: ПДАБА. 2022. – 256 с.
4. Зеленський А. Г. Монографія. Варіант математичної теорії ортотропних і фізично

ДОВГОВІЧНІСТЬ ПІДВІСНОГО ТРУБОПРОВОДУ В УМОВАХ НЕРІВНОМІРНОЇ КОРОЗІЇ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

О. А. Дзюба

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Прогнозування довговічності силових елементів конструкцій, що знаходяться під дією екстремального термосилового навантаження та впливу корозійного зношування поверхні є однією із актуальних задач проектування конструкцій.

Задача полягає в необхідності урахування зниження несучої здатності та довговічності конструкції в результаті зменшення геометричних розмірів (товщини стінки) силового елемента (трубопроводу) внаслідок корозії. Це призводить до збільшення напружень, що у відповідності до низки відомих математичних моделей корозійного ураження прискорює корозійну деградацію поверхні матеріалу.

Така взаємодія рівня напруженості конструкції і швидкості корозійного ураження суттєво ускладнює задачі прогнозування її довговічності.

Розрахункова схема наповненого рідиною підвісного трубопроводу приймається у вигляді фрагменту багатоопорної балки, кінці якої шарнірно оперті і навантажені опорними моментами, величини яких, у свою чергу, залежать від жорсткостей (що зменшуються в результаті корозійного ураження) сусідніх прольотів.

Очевидно, що згинальний момент і, як наслідок, напруження є змінними по довжині прольоту трубопроводу, навантаженого власною вагою та вагою рідини.

Приймається до уваги, що по висоті перерізу напруження також змінюються: від стиснутої верхньої частини до розтягнутої нижньої.

Корозійне ураження зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби (поперечний переріз якої має кільцеву форму) описуються різними математичними моделями корозії, що найбільш повно представляють атмосферну корозію для зовнішньої поверхні труби, та корозійну деградацію внутрішньої поверхні під дією агресивного середовища рідини з певними властивостями.

Нерівномірність корозійного ураження поверхонь труби в напрямку кругової координати також враховується шляхом змінності відповідних параметрів прийнятих математичних моделей корозії.

Побудована узагальнена методологія розв'язування широкого кола задач прогнозування високо напружених елементів конструкції в агресивному середовищі.

Реалізація підходу ґрунтується на використанні авторського алгоритму комп'ютерного моделювання процесу нерівномірної деградації поверхонь трубопроводу в агресивному середовищі.

Результати числових розрахунків подані у вигляді графіків зміни в часі критичних напружень та конфігурацій пошкоджених корозією перерізів.

ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПОШУКИ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОДЯНОГО КУЛЕУЛОВЛЮВАЧА

Р.В. Коба¹, В.А. Максимюк¹, В.С. Ушакова¹, О.В. Ушаков²

¹*Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України,*

²*Інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України*

Кулеуловлювачі застосовують для експертизи та ідентифікації зброї за слідами на кулях. У зв'язку з розширенням імпорту й обігу вогнепальної зброї та введенням Єдиного реєстру зброї потреба в якісних кулеуловлювачах зростає. А оскільки вартість імпортованих заводських кулеуловлювачів є досить високою, то доцільно розробити власний, який надалі можна запустити в серійне виробництво.

Одними з кращих є водяні кулеуловлювачі [1], які власне є металевими трубами, заповненими водою. Вони дозволяють сповільнити кулю зі збереженням слідів відстрілу та без пошкодження й деформування. Після пострілу кінетична енергія сповільнюваної кулі переходить переважно в потенціальну енергію деформації труби й нагрівання води. Ця деформація має бути в межах пружності матеріалу. Для цього необхідно вибрати належні геометричні (довжина, діаметр, товщина стінки) параметри труби. Теоретичні розрахунки таких параметрів є вкрай складними, а їх достовірність важко оцінити. Тому було запропоновано експериментальний шлях пошуку оптимальних параметрів кулеуловлювача.

Для визначення товщі води, яка сповільнює кулю до прийнятної швидкості, було використано наявний в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України вертикальний бак висотою 3 м і діаметром 3,2 м з прозорим вікном на середині висоти для спостереження. Відстрілювались кулі калібром 9 мм та 7,62 мм. Фільмуванням, візуальними спостереженнями за швидкістю кулі через вікно та оглядом витягнутої кулі було встановлено, що на глибині 2 м куля сповільнюється до прийнятної швидкості, що узгоджується з результатами [1].

Для визначення оптимальної товщини стінки циліндричного гідрокулеуловлювача пропонується виконати додаткові експерименти на базі Інституту механіки за допомогою тензодатчиків деформації та з використанням 8-канального реєстратора вібраційних, акустичних і тензосигналів LMS SCADAS Mobile (Бельгія) [2]. Крім того, такі експерименти дозволять встановити розподіл динамічних деформацій вздовж труби та оцінити рівень динамічного тиску в рідині.

1. Ганзюк А.Л., Кравчук О.В., Гордєєв А.І. Особливості будови, розрахунку та експлуатації гідрокулеуловлювачів // Криміналістичний вісник.—2023.—40(2).—С.7–15.
2. Максимюк В.А., Сущенко Є.О. До верифікації тензометричних експериментів на реєстраторі LMS SCADAS Mobile // Тези доповідей Другої міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження) «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій», 10 – 12 жовтня 2019 р., м. Дніпро. – Дніпро: ДНУ, 2019. – С. 168–169.

**МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
ШИРОКОМАСШТАБНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ**

А. П. Дзюба, П. А. Дзюба

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Експериментальні дослідження займають важливе місце у вивченні найбільш проблемних аспектів поведінки багатьох елементів конструкцій. Серед таких проблем особливе місце займають дослідження стійкості оболонкових елементів конструкцій з пошкодженнями однорідності різної природи. Складність теоретичного дослідження проблеми обумовлюється тим, що ще задовго до досягнення навантаженням свого критичного значення можливий значний перерозподіл навантажень, викликаний взаємодією двох полів – основного напруженого стану, що поширюється по всій поверхні оболонки, і зони збурення напружень поблизу отвору, що виникає раніше, ніж настає загальна втрата несучої здатності оболонки. А це, в свою чергу, призводить до суттєвої нелінійності задачі у цілому, розв'язок якої пов'язаний зі значними математичними труднощами.

Однією з перших задач, з якою зустрічається експериментатор у своїх дослідженнях, є виготовлення моделей (зразків) для проведення випробувань. Основна проблема при цьому полягає у тому, що моделі повинні бути такими, щоб різниця значень досліджуваного параметра (в даному випадку критичних навантажень) для різних номінально однакових зразків була меншою різниці, пов'язаної зі зміною досліджуваного параметра. Цей аспект експериментального дослідження стійкості висуває, як першочергову, проблему виготовлення номінально однакових високоякісних оболонок.

Слід зазначити, що масове виготовлення таких високоякісних моделей із застосуванням сучасних технологій можливе, але пов'язане з досить високою вартістю навіть для випадку невеликої серії моделей.

Найбільш істотним, практично неконтрольованим фактором, особливо при осьовому стиску виготовлених із листових матеріалів циліндричних оболонок, є початкові геометричні недосконалості форми. Відома досить висока чутливість величини критичної сили втрати стійкості гладкої циліндричної оболонки до таких початкових геометричних недосконалостей форми, умов закріплення, різнотовщинності, нерівномірності навантаження та інших факторів, що мають місце вже при виготовленні, і які, як показують результати досліджень, часто й ініціюють втрату стійкості оболонки.

При цьому величина таких недосконалостей для моделі, виготовленої з листового матеріалу, у значній мірі визначається її відносною товщиною δ/R , де δ , R – товщина стінки і радіус кривини оболонки, відповідно. Зменшення параметра δ/R приводить до збільшення впливу початкових геометричних недосконалостей і, як результат, – до різкого падіння критичних напружень та фактичного нівелювання впливу зміни досліджуваного параметра на процес та кількісні параметри втрати стійкості.

Прагнення експериментатора зменшити чи виключити, по можливості, вплив таких початкових геометричних недосконалостей, приводить до необхідності проведення дослідження на моделях з можливо більшим значенням відносної товщини. Очевидно, що при збільшенні відносної товщини δ/R згинальна жорсткість оболонки зростає і, як наслідок, зменшується вплив відносного початкового прогину, як недосконалості геометричної форми, на докритичну поведінку та величину критичного навантаження оболонки. Одночасно з цим зростають критичні напруження і, як наслідок, починає проявлятися інший фактор – поява пластичних деформацій, що зменшує діапазон, а часто і виключає можливість проведення експерименту в пружній області. Початок прояву цього

фактора для різних матеріалів визначається відношенням границі текучості до модуля пружності (σ_T/E), як певного граничного значення відносної товщини, який дає можливість уникнути пластичних деформацій. Чим вище значення цього відношення, тим більшим є діапазон випробовування оболонки в пружній області.

З листових металів найбільше значення цей параметр має для широко застосовуваної в експериментальних дослідженнях тонкої нагартованої нержавіючої сталі марки X18H9Н, для якої $\sigma_T/E \approx 4,0-4,5 \cdot 10^{-3}$, що дозволяє проводити в пружній області дослідження стійкості циліндричних оболонок при навантаженні їх осовою стискаючою силою до максимальних значень $\delta/R = 6,5 \div 7,0 \cdot 10^{-3}$.

Для проведення широкомасштабних експериментальних досліджень стійкості циліндричних оболонок ефективним виявилось виготовлення моделей із креслярського паперу марки „В” ДСТ 597-73. Цей матеріал відрізняється досить високою стабільністю і однорідністю механічних характеристик (показників пружності та міцності), а також геометрії листа, хоча і має ортотропію механічних властивостей.

Основні механічні характеристики матеріалу, який використовувався для виготовлення досліджуваних моделей оболонок, визначалися з діаграм „ σ - ϵ ”, побудованих за результатами окремих спеціально проведених експериментальних досліджень, виконаних як на плоских зразках, так і на оболонках за допомогою електромеханічної системи, що дозволяло проводити досить точні вимірювання. Механічні характеристики виявились наступними: модулі пружності $E_x = 6,9 \text{ ГПа}$, $E_y = 3,45 \text{ ГПа}$, $G_{xy} = 1,92 \text{ ГПа}$, коефіцієнти Пуассона $\mu_x = 0,3$; $\mu_y = 0,15$, межі міцності $\sigma_{x,b} = 45 \text{ МПа}$, $\sigma_{y,b} = 30 \text{ МПа}$. Тут, індекси x і y відповідають головним напрямкам ортотропії паперу. Товщина аркуша становила $\delta = 0,00023 \text{ м}$, а її вимірювання проводилося індикатором годинникового типу із ціною поділки шкали 10^{-6} м . Ця величина була практично постійною щонайменше в межах однієї партії паперу. Щільність паперу становила 200 г/м^2 .

У цілому, як показали експериментальні дослідження механічних властивостей, матеріал зазначеної марки паперу („В” ДСТ 597-73) має відношення умовної межі текучості σ_T до модуля пружності E_x у поздовжньому напрямку $\sigma_T/E_x \approx 3,6 \cdot 10^{-3}$, що дає можливість проводити експериментальні дослідження в пружній області на моделях з порівняно великою відносною товщиною (до $\delta/R \approx 6 \cdot 10^{-3}$), а значить за меншого впливу початкових геометричних недосконалостей.

Таким чином, виявляється, що, незважаючи на низькі, у порівнянні з металами, абсолютні значення пружних характеристик паперу, відношення границі текучості до модуля пружності у вибраного в цій роботі для проведення експериментальних досліджень матеріалу виявляється вищим, ніж у більшості інших матеріалів, включаючи і метали, та майже досягає цих показників для високоміцної (високолегованої нержавіючої) сталі. Це дозволяє мати досить широкі межі проведення експерименту в пружній стадії деформування.

Важливою властивістю паперового аркуша є також його висока технологічність, що обумовлює досить просте виготовлення високоякісних практично ідентичних зразків та підготовки їх до випробувань, а також ефективні методики навантаження та вимірювань, які вдається реалізувати без істотних матеріальних витрат.

Зазначені властивості вибраного матеріалу для виготовлення моделей оболонок дозволяють провести досить широкомасштабні комплексні експериментальні дослідження впливу параметрів пошкоджень на величину критичної сили втрати несучої здатності, які практично неможливо виконати на металевих оболонках.

Серед інших підходів до виготовлення і використання ідентичних моделей для випробувань є використання композитних матеріалів, зокрема, склопластикових циліндричних оболонок, які виготовляються із виконанням вимог масштабного

моделювання натуральних конструкцій з двох шарів склотканини ТС 8/3-250, попередньо просоченої сполучником ЕФ-32-301, з укладенням основи склотканини під кутами 0° і 90° , вмістом наповнювача і сполучника відповідно 70% і 30% та отупінню полімеризації 98%. Такі склопластикові моделі оболонок мають надзвичайно корисну здатність до повторних випробувань, що дозволяє одержувати досить достовірну картину всього досліджуваного процесу.

Механічні характеристики та геометричні параметри таких склопластикових оболонок виявились наступними: $E_x = 29 \text{ ГПа}$; $E_y = 16 \text{ ГПа}$; $G_{xy} = 9 \text{ ГПа}$; $\mu_x = 0,21$; $\mu_y = 0,11$; $R = 0,1 \text{ м}$; $L_p = 0,25 \text{ м}$; $\delta = 0,0005 \text{ м}$; $\delta/R \approx 5 \cdot 10^{-3}$.

Виготовлені таким чином моделі оболонок мали досить високий рівень межі пружності матеріалу моделей, що при певних умовах, дозволяло проводити багаторазові (повторні) випробування однієї і тієї ж моделі для дослідження впливу змінюваних параметрів, зокрема, при збільшенні розмірів отворів чи їх кількості, зберігаючи при цьому досить високий рівень стабільності величини критичних зусиль втрати стійкості та практично ідентичну картину хвилеутворення без розшарування або руйнування матеріалу оболонки при повторних випробуваннях в пружній області одних і тих же моделей, що і покладено основним принципом методики дослідження.

Можливості такого багаторазового навантаження обґрунтовувалось додатково. Так, багаторазово проведені навантаження оболонки на низькому, а потім на більш високому рівнях навантаження і далі до втрати стійкості та розвантаження, показали, що розкид величини критичного навантаження при 25-кратному повторному навантаженні, п'ять із яких проводилися до втрати стійкості, становив лише 2,5 %, що і вказувало на досить високу вірогідність результатів експерименту.

Ця властивість була закладена в основу методики випробувань, а саме: дослідження впливу зміни розміру і форми (кругового, квадратного) отвору на величини критичної сили втрати стійкості моделей склопластикових оболонок, яка відбувалася в пружній області в процесі багаторазового повторного використання однієї і тієї ж моделі із заздалегідь відомою величиною базового критичного навантаження.

Результати системних експериментальних досліджень стійкості виготовлених із зазначених матеріалів циліндричних оболонок з отворами різної форми, розмірів, кількості і розташування дозволяють стверджувати про ефективність їх використання. Результати випробувань добре погоджуються (там, де можливі такі порівняння) з відомими даними для моделей оболонок, виготовлених з інших матеріалів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ, РОЗТЯГНУТОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНКИ З ОТВОРОМ

О. А. Дзюба, В. В. Гудзь

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Сучасні прикладні пакети скінченно-елементного аналізу надають широкі можливості для використання всього спектру засобів цього ефективного підходу. Це, зокрема, використання різної кількості, розмірів та типів скінчених елементів, згущення сітки в околі високих градієнтів зміни напружено-деформованого стану, а також вибору крайових умов, зокрема, умов взаємодії з іншими підконструкціями, врахування зовнішніх впливів та ін.

В поданій роботі приведені результати числового експерименту дослідження особливостей впливу вибору крайових умов та кількості скінчених елементів на результати розрахунку розтягнутої в своїй площині прямокутної пластини з довільно розташованим прямокутним отвором.

Проведено скінченно-елементний порівняльний аналіз розрахунку такої затиснутої по одній із кромek пластинки з довільно розташованим прямокутним отвором (люком), як фрагменту панелі міжступеневого відсіку ракети-носія. При цьому на протилежній кромці (при вільних бокових) цієї пластинки були прикладені:

а) рівномірно розподілені напруження від наслідуючої маси вище розташованих конструктивних елементів;

б) рівномірні по довжині кромки переміщення від жорсткого з'єднувального шпангоута вище розташованого відсіку.

Розрахунки для цих двох варіантів крайових умов, за відповідного узгодження величин рівномірного напруження для задачі а) та рівномірного переміщення для задачі б), були проведені за різним по ширині пластинки розташуванням прямокутного отвору та кількості скінчених елементів.

Продемонстровано відмінність отримуваних значень та розподілу напружень в пластині для зазначених вище різних крайових умов однієї і тієї ж задачі за різної кількості скінчених елементів та різного розташування прямокутного отвору.

Наведені результати демонструють, що навіть за використання ефективних засобів розрахунку можливе отримання різних, в тому числі і помилкових, результатів.

Матеріали дослідження подані у вигляді картин розподілу напружень для різних варіантів розрахунку.

**ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ОЧИСНОГО
ПОРШНЯ У ЗВУЖЕНІЙ ДІЛЯНЦІ ТРУБОПРОВОДУ**

С.М.Стецюк¹, Я.В.Дорошенко¹, І.П.Шацький², А.С.Величкович¹

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*
²*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України*

Під час очищення промислових газопроводів від забруднень за допомогою деформівних поршнів виникає низка технологічних проблем, серед яких недостатній тиск газового рушія та наявність перешкод у вигляді локальних звужень труби, викривлення її осі, відводів та розгалужень [1].

Використовуючи попередній досвід [2], розроблено одновимірну інженерну модель для аналітичного дослідження фрикційної взаємодії деформівного стержня зі стінкою конічного перехідника з одного діаметра труби на інший. Моделювання здійснено у квазістатичній постановці. Ключовим елементом моделі є врахування нерівномірного натягу в осесиметричному контакті “циліндр – труба” на звуженій ділянці. За розв’язком сформульованої контактної задачі досліджено вплив сил тертя та малої конусності перехідника на напружений стан циліндра та на величину запоршневого тиску, необхідного для проходження поршнем звуженої ділянки труби без зупинок. Показано, що опір просуванню стержня має дві складові: фрикційну – від тертя об стінку труби та деформаційну – від зміни її попереччя.

Розроблено експериментальну установку для вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху дослідних зразків поршнів у трубах зі змінним діаметром. Лабораторні та промислові випробування показали, що проходити перехідник з реальною конусністю здатний тільки манжетно-чашковий очисний поршень із силіконового компаунду. При цьому запоршневий тиск сягає 10 атм. Суцільні пінополіуретанові поршні або застрягають у звуженні зі значною конусністю, або фрагментуються на виході з труби.

1. Stetsiuk S., Doroshenko Y., Bondarenko R., Filipchuk O., Volovetskyi V. Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Ser. Transport. – 2024. – 123. – P. 303–317.
2. Попадюк І.Й., Шацький І.П., Шоп В.М. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 180 с.

THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF THE MOVEMENT OF THE CLEANING PISTON IN A NARROWED SECTION OF THE PIPELINE

S.M.Stetsiuk, Ya.V.Doroshenko, I.P.Shatskyi, A.S.Velychkovych

A one-dimensional engineering model was developed for the analytical study of the frictional interaction of the cleaning piston with the wall of the conical adapter of the pipeline. A theoretical simulation and experimental measurement of the piston pressure required for the piston to pass through the narrowed section of the pipe without stopping was carried out.

ON THE INFLUENCE OF INCLUSION FROM A FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL ON THE STRESS CONCENTRATION IN A THIN PLATE WITH A SQUARE HOLE

B. I. Terokhin, E. L. Hart

Oles Honchar Dnipro National University

As a result of numerical study of thin plates with a square hole and a radially inhomogeneous inclusion behavior, the influence of changing the value of the elastic modulus of the FGM inclusion and its width on the SCF in the plate was analyzed. The rational parameters of a radially inhomogeneous FGM inclusion were established, allowing to obtain a mechanical effect: a decrease of the SCF and corresponding deformations by ~67%. The presence of FGM inclusions with certain mechanical properties and geometric parameters allows to influence not only the value of the SCF in the elements of the plate-shell structure near local stress concentrators, but also the distribution of stresses over their surface. This feature of FGM inclusions makes it possible to avoid stress surges, especially at the junction of the inclusion with the matrix.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ ПЛАСТИН З ТРИКУТНИМ ОТВОРОМ

Е. Л. Гарт, А. А. Сяєва

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Сучасна інженерія стикається з численними викликами при проєктуванні конструкцій, що зазнають різноманітних навантажень. Внаслідок вимог до оптимізації міцності і ваги, в таких галузях, як аерокосмічна, будівельна та військова промисловість, широко застосовуються кусково-однорідні пластини. Введення отворів або вставок у такі пластини для поліпшення експлуатаційних характеристик призводить до виникнення неоднорідностей у матеріалі. Це, у свою чергу, впливає на розподіл напружень, що може спричиняти їх локальну концентрацію та збільшувати ймовірність руйнування конструкції. Для детального вивчення напружено-деформованого стану (НДС) таких складних систем активно застосовують числові методи, зокрема метод скінчених елементів (МСЕ), який є універсальним інструментом для моделювання та аналізу поведінки складних конструкцій, у тому числі, з неоднорідностями. Застосування цього методу дозволяє оптимізувати, зокрема, конструкції бронетехніки та авіаційних засобів, підвищуючи їх мобільність, рівень захисту та ефективність в екстремальних умовах експлуатації. Крім того, за допомогою МСЕ доцільно здійснювати прогнозування поведінки конструкцій під навантаженням, що сприяє розробці ефективних інженерних рішень для мінімізації ризику їх руйнування.

У цій роботі досліджено НДС кусково-однорідної пластини з малим трикутним отвором. Особлива увага приділяється впливу геометричних параметрів (ширини) та механічних властивостей центральної вставки з іншого матеріалу на концентрацію напружень навколо отвору. Для розв'язання цієї задачі використано МСЕ. Метою роботи є визначення коефіцієнта концентрації напружень (ККН) для різних конфігурацій кусково-неоднорідних пластин з отвором, а також проведення порівняльного аналізу одержаних числових результатів з відомими розв'язками для окремих випадків [1 – 4].

Розрахунки проведено для кусково-однорідних пластин розмірами $l_1 \times l_2$ з трикутним отвором, розташованим по центру пластин, та центральною вставкою

ширини h з іншого матеріалу. Вставка має товщину, що дорівнює товщині пластини, її ширина варіювалась. Пластини знаходились під дією одновісного рівномірного розтягу $p = \text{const}$. Вважалось, що отвір змодельований як рівносторонній трикутник, вписаний в коло радіуса r , при цьому використовували процедуру заокруглення його кутів. На границі між центральною вставкою і матрицею (пластиною) задано умови ідеального механічного контакту. Розглянуто такі варіанти ширини вставки:

- 1) $h = 2r$ (h – ширина вставки із матеріалу з модулем пружності E_2 і коефіцієнтом Пуассона ν_2); 2) $h > 2r$ ($h=3r$; $4r$); 3) $h < 2r$ ($h=1,5r$; r).

Для кожного варіанту проведено порівняльний аналіз ККН з даними для однорідної пластини і визначено раціональну конфігурацію з точки зору зменшення величини ККН.

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунків для задачі визначення НДС кусково-однорідних пластин з результатами для однорідної пластини з трикутним отвором

h, m	ККН	$\Delta_1, \%$	$\Delta_1, \text{раз}$	$\epsilon_i^{\max}, 10^{-4}$	$\Delta_2, \%$	Δ_2, P
$4r(0,08)$	2,303	-78,94	4,75	0,8040	-73,57	3,78
$3r(0,06)$	2,310	-78,88	4,74	0,8215	-72,99	3,70
$2r(0,04)$	2,342	-78,59	4,67	0,8267	-72,83	3,68
$1,5r(0,0)$	2,443	-77,67	4,48	0,8587	-71,77	3,54
$r(0,02)$	2,487	-77,27	4,40	0,9565	-68,56	3,18

Тут Δ_1 , Δ_2 – відхилення ККН і відповідних максимальних деформацій для розглянутих випадків різної ширини вставки для кусково-однорідної пластини з трикутним отвором від величини ККН і відповідних максимальних деформацій для однорідної пластини з трикутним отвором без вставки (ККН = 10,938, $\epsilon_i^{\max} = 3,042 \cdot 10^{-4}$).

На рис. 1, як приклад, наведено розподіл відносної інтенсивності напружень вздовж розгортки трикутного отвору в однорідній пластині та кусково-однорідних пластинах з різною шириною вставки (суцільна лінія відповідає однорідній пластині).

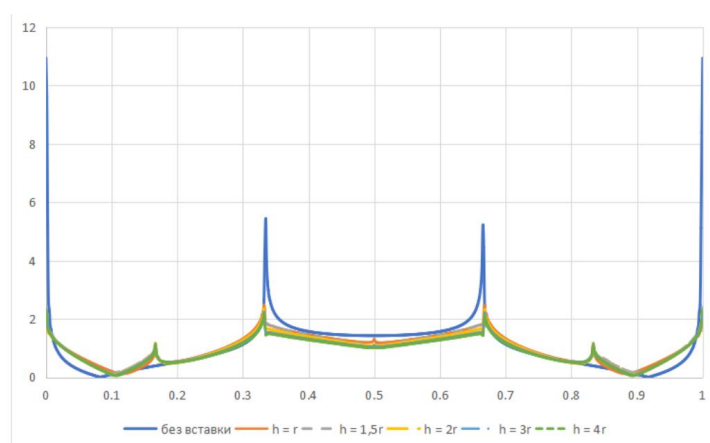


Рис. 1 – Розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/p вздовж контуру отвору в однорідній пластині та кусково-однорідних пластинах з різною шириною вставки

Аналіз одержаних результатів показує, що трикутний отвір є значним концентратором напружень, а величина ККН в кусково-однорідній пластині суттєво залежить як від геометричних, так і механічних параметрів вставки. Якщо модуль пружності вставки менший за модуль пружності пластини у 3 рази, це дозволяє зменшити значення ККН від $\sim 4,4$ до $\sim 4,8$ разів (в залежності від ширини вставки) у порівнянні з однорідною пластиною. При збільшенні ширини вставки від r до $4r$ ККН зменшується, але ця залежність є несуттєвою: з 2,487 до 2,303 (приблизно на 7%). Значний вплив на концентрацію напружень має конфігурація отвору: ККН для пластини з трикутним отвором виявляється в $\sim 3,7$ разів більше, ніж для пластини з круговим [4]. Використання в пластині центральної вставки з «м'якого» матеріалу показало свою ефективність щодо можливості зниження концентрації напружень. Із розглянутих варіантів найкращий результат одержано при вставці ширини $4r$, що дало змогу зменшити величину ККН в $\sim 4,8$ разів у порівнянні з однорідною пластиною.

Перспективним є знаходження раціональних параметрів для кусково-однорідних пластин з іншими конфігураціями отворів, їх кількості та розташування.

Література

1. *Гарт Е. Л., Поцелуйко Є. О.* Комп'ютерне моделювання поведінки кусково-однорідних пластин з двома круговими та еліптичними отворами // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2022. – Вип. 34. – С. 23–35. <https://pommk.dp.ua/index.php/journal/article/view/545/544>
2. *Гарт Е. Л., Терьохін Б. І., Семенча О. О.* Посібник до вивчення дисципліни «Прикладні обчислювальні технології». – Дніпро: Ліра, 2023. – 92 с. http://lib.dsu.dp.ua/rep/mmfm/knygy/avtor/Posib_do_vyvch_dysc_Prykladni_obchysl_tehnologiyi.pdf
3. *Гарт Е. Л., Халінов І. О.* Числове дослідження концентрації напружень у тонкостінній кусково-однорідній циліндричній оболонці з круговим отвором // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2023. – Вип. 37. – С. 5–19. <https://doi.org/10.15421/4223212>
4. *Савин Г. Н.* Распределение напряжений около отверстий. – К.: Наук. думка, 1968. – 888 с.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДОРОЗМОЛЬНИХ МЛИНІВ

Гнітько В.

Інститут енергетичних машин та систем ім. А. М. Підгорного

Розроблено методику та спеціалізовану програму розрахунку оболонок обертання для визначення переміщень і напружень в рудорозмельних млинах при несиметричному навантаженні. Рудорозмельні млини є складними просторовими конструкціями, що розглядаються як складені розгалужені оболонки обертання, підкріплені ребрами. Методи розрахунку таких конструкцій з урахуванням меридіональних ребер за теорією конструктивно-ортотропних оболонок розроблені досить добре. У розрахункових схемах сучасних пакетів програм враховуються власна вага барабана, вага кульового завантаження та реакція опор, тоді як у розробленій спеціалізованій програмі додатково враховані відцентрові сили барабана, пульпи та футеровки, реалізовано розгалуження меридіана барабана, а також розглянуто можливість спирання цапфи на один або два підшипники, рознесених у перерізі цапфи

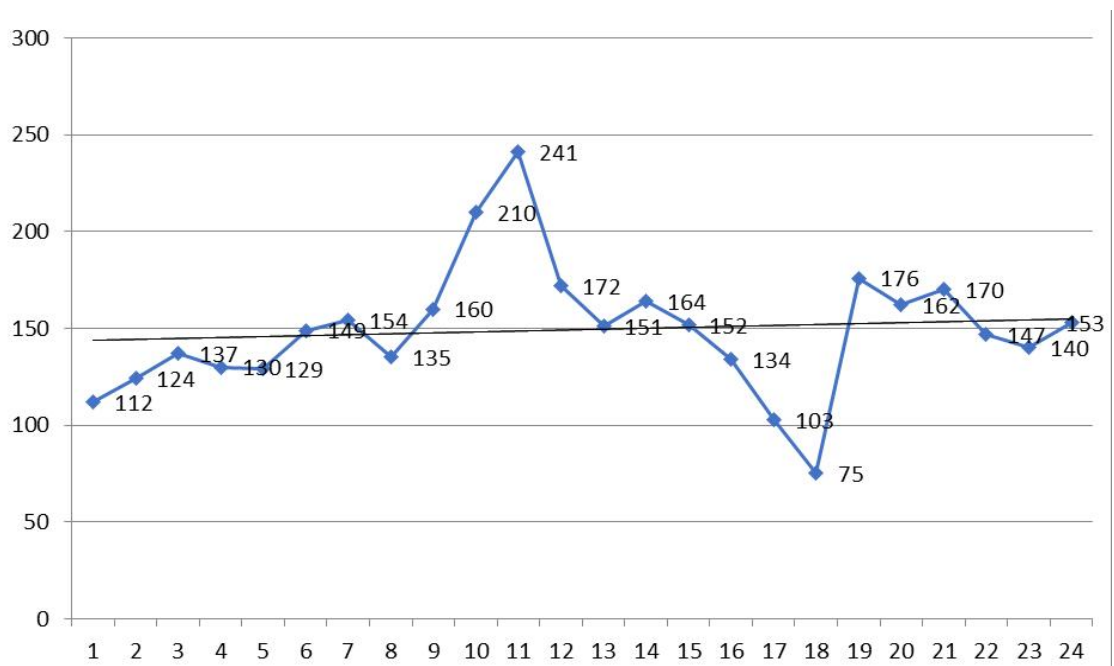
під кутом φ . Розглянуті конструкції, навантажені власною вагою, вагою футеровки у вигляді броньових плит, а також вагою руди, яка в суміші з водою подрібнюється металевими шарами чи стрижнями, що знаходяться в циліндричному барабані. Подрібнення руди відбувається внаслідок обертання конструкції, розташованої горизонтально, яка спирається на підшипники ковзання. Це вимагає врахування відцентрових сил вказаних мас, а також з боку підшипників. Детально описано обчислення навантажень та їх подання рядами Фур'є. В роботі розглянуто питання врахування жорстких зсувів при розрахунку міцності конструкції. Згідно з викладеною методикою розв'язання неосесиметричних задач для оболонок обертання отримані зображення шуканих навантажень рядами Фур'є та визначена похибка урахування навантажень при утриманні скінченної кількості членів ряду. На основі запропонованої у роботі скінчено-елементної моделі проведені числові дослідження напружено-деформованого стану барабанів рудорозмельних млинів різної конструкції, включаючи ті, що мають розгалужений меридіан. Наведені результати розрахунків дозволяють моделювати напружено-деформований стан барабанів і обирати оптимальні з точки зору міцності та жорсткості параметри конструкції.

В подальшому передбачаються дослідження міцності просторових конструкцій, що виготовлені з композитних матеріалів [1].

Література

Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2022) 1068:223-229. [doi:10.4028/p-888232](https://doi.org/10.4028/p-888232).

**МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ**



Кількість доповідей за 2001-2024 роки