

INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC

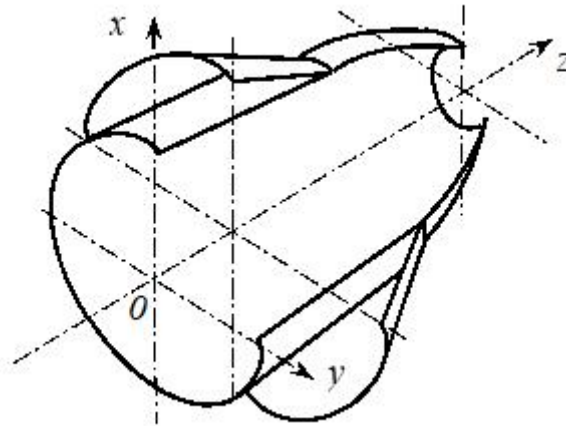
*ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE
MPTM 2025*

April 15-17, 2025
Dnipro, Ukraine

Book of Abstracts
Part 1

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2025

Матеріали конференції



Дніпро – 2025

МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2025

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

Секція <i>Механіка</i>	сторінки 3-59
Секція <i>Іноваційні технології</i>	сторінки 60-90

*В рамках другої частини конференції (листопад 2025 р.) буде проведено
Симпозіум «Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій», присвячений
90-ій річниці від дня народження академіка В.В. Пилипенка*

XXV МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
“МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2025”
Частина 1 (квітень 2024)

ЗМІСТ

Доповіді секцій: Механіка деформівного твердого тіла та механіка рідини, газу та плазми (15-17 квітня 2025)

1.(10) П.О. Стеблянко Відкриття Ювілейної міжнародної наукової конференції МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ (2001-2025).	6
2(7) В. П. Пошивалов ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПОВЗУЧОСТІ	8
3(53) А.П. Дзюба, В.М. Сіренко ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ МІЩНОСТІ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ПОХИБОК ВХІДНИХ ДАНИХ	9
4 (6)М. Бабешко, В. Савченко, С. Склепус, П. Стеблянко МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НОВОЇ ТЕХНІКИ В ПРОЦЕСАХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ	10
5(22) О.Р. Гачкевич, Т.В. Козакевич, Т. Волчаньські ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У СТАЛЕВИХ ТІЛАХ ПРИ НАГРІВІ	12
6 (47) N. Chondhary, O. Sierikova, O. Strelnikova, A. Kolodiaznyi STABILITY OF IDEAL FLUID MOTION IN SHELL STRUCTURE	13
7(49) K. Murawski, K.G. Degtyarev, M.T. Korneichuk, O.M. Sierikova, O.O. Strelnikova COMPUTER MODELING OF HYDROELASTIC VIBRATIONS OF A BLADE UNDER FUZZY LOADING CONDITIONS	14
8(54) Я.О. Жук, М.М. Мельниченко, В.О. Гусак МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОФОРМУВАННЯ	15
9(8) В.П.Пошивалов, Ю.А.Черняков, П.О.Стеблянко ПОШКОДЖУВАНІСТЬ І РУЙНУВАННЯ НЕПРУЖНИХ ТІЛ ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	17
10(18) О.М.Горечко, Н.О.Заводовська ВПЛИВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ПРУЖНОСТЕЙ КРІПЛЕННЯ НАГРІТОЇ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНКИ НА ЇЇ ВІБРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	17
11(2) Т.С. Кагадій, І.В. Щербина, А.Г. Шпорта ЗАДАЧА ПРО ВДАВЛЮВАННЯ ШТАМПА З ЧАСТКОВИМ ПРОКОВЗУВАННЯМ В КРИВОЛІНІЙНУ АНІЗОТРОПНУ ПЛАСТИНУ	19
12(9) О.Д. Онопрієнко, В.Б. Говоруха ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА КОНТАКТНУ ЗОНУ МІЖФАЗНОЇ ТРИЩИНИ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛАХ	20
13(12) О.М. Багно, Г.І. Щурук УМОВИ ІСНУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ МОД ЛЕМБА У ГІДРОПРУЖНОМУ ХВИЛЕВОДІ	21

14(14) Є.М. Ірза ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІІ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ТА СТРУКТУРИ	22
15(20) М.О. Ульянов, Т.В. Ходанен СИСТЕМА ЕЛЕКТРИЧНО ІЗОЛЮВАННИХ ТРИЩИН НА МЕЖІ ПОДІЛУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	23
16(21) Р.В. Коба, В.А. Максимюк, В.С. Ушакова, О.В. Ушаков ПРО УДАРНІ ХВИЛІ У ВОДЯНОМУ КУЛЕУЛОВЛЮВАЧІ	24
17(15) Є.Д. Рябченко АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ ЗІ ЗМІННИМИ ВЗДОВЖ МЕРИДІАНА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРІАЛУ	25
18(26) С.М. Склепус ГЕОМЕТРИЧНО НЕЛІНІЙНИЙ ЗГИН ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПЛАСТИН СКЛАДНОЇ ФОРМИ	28
19(27) М.О. Бабешко, В.Г. Савченко АЛГОРИТМ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО СТАНУ ТОНКИХ ОБОЛОНОК ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО - ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ	29
20(28) А.В. Сохацький, А.Ю. Дреус ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОМПОНОВОК БЕЗПЛОТНИХ НАДВОДНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	30
21(24) E. L. Hart, A. A. Syaseva COMPUTER SIMULATION OF ELASTIC DEFORMATION OF BIMATERIAL PLATES WITH TRIANGULAR HOLES DEPENDING ON THE COMBINATION OF MATERIALS	31
22(29) Р.В. Ткаченко, Н.Є. Ткаченко ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО ЗБУДЖЕННЯ НА РУХ ЦИЛІНДРА З РІДИНОЮ З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ, ЩО ЗНАХОДИТЬСЯ НА РУХОМІЙ ПЛАТФОРМІ	33
23(31) Ю. П. Глухов ПРО ОДНУ ДИНАМІЧНУ ЗАДАЧУ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПОЛОСИ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ	34
24(32) І. Ю. Гергель ПРО СТІЙКІСТЬ ТРЬОХШАРОВОГО ТІЛА З МІЖФАЗНИМ ДЕФЕКТОМ	35
25(33) K.V. Panin INFLUENCE OF LOADING HISTORY ON THE INITIAL ANGLE OF CRACK PROPAGATION	36
26(39) А. Ю. Глухов АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИСПЕРСІЙНИХ РІВНЯНЬ ДЛЯ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ В СТИСЛИВОМУ КОМПОЗИТНОМУ МАТЕРІАЛІ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ ПРОКОВЗУВАННІ ШАРІВ	37
27(40) Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КОНТАКТУ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ДВОШАРОВОГО ТІЛА З ВРАХУВАННЯМ ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ	38
28(42) О.В. Комаров СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРОНИКНИХ ТРИЩИН НА МЕЖІ РОЗДІЛУ ДВОХ ОДНОВИМІРНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КВАЗІКРИСТАЛІВ	40
29(43) І.К. Сенченков, О.П. Червінко, О.В. Доля СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ 3D-ПРИНТУ ПЛОСКИХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	41
30(30) К.В. Бабій, Г.І. Ларіонов, О.В. Говоруха, А.І. Рябко МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА НА ОСНОВІ ГЕОМЕХАНІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ВАРІАЦІЇ ВПЛИВОВИХ ПАРАМЕТРІВ	42
31(44) Ю.Ю. Абросов МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ДОВГОЇ ТОНКОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ СУПЕРКОЛОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ	46

32(45) Т.В. Ходанен , В.В. Дерев'янюк МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ЕЛІПТИЧНОЇ ТРІЩИНИ В ІЗОТРОПНОМУ ТІЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ANSYS SMART CRACK GROWTH	50
33(46) А.О. Молчанов ПРО НАБЛИЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ 2D ПОЛІВ В ОКОЛІ КУТОВИХ ТОЧОК ОБЛАСТІ ВИЗНАЧЕННЯ	51
34(48) Р.О. Щербак , А.Є. Шевельова ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ ДЛЯ НАВАНТАЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ВИГЛЯДУ	53
35(52) К. Degtyarev, V. Gnitko, O. Sierikova, D. Sinchenko, O. Strelnikova OPTIMAL DESIGN OF WIND POWER PLANT BLADES	54
36(55) Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко ДО ВРАХУВАННЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДВОШАРОВОЇ ПЛАСТИНИ З ДЕФЕКТАМИ	55
37(1) А. М. Пасічник , Т. Ж. Надригайло, Д.В. Нежумиря РОЗРАХУНОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНОГО РОТАЦІЙНОГО ДВИГУНА	56
38(23) М.Ю. Ріпа ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ ВІБРАЦІЙ ОБЛАДНАННЯ НА АКУСТИЧНІ ХВИЛІ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ	58



Міжнародна наукова конференція МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ (2001-2025)

П.О. Стебляк

Ювілейна Міжнародна наукова конференція *МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ 2025* присвячується пам'яті людини, яка підтримала ідею і очолила цю конференцію, видатного вченого академіка НАН України Пилипенка Віктора Васильовича (15.11.1935- 25.05.2015)



Пилипенко Віктор Васильович закінчив із відзнакою фізико-технічний факультет Дніпропетровського державного університету (ДДУ) (1959). Кандидат технічних наук (1961). Лікар технічних наук (1968). Професор (1971). Член-кор. АН УРСР (1979). Академік Національної Академії наук України (НАНУ) (1982).

Після закінчення ДДУ працював інженером у руховому конструкторському бюро (КБ-4) КБ "Південне", ст. інженером (1961), начальником групи (1962), начальником сектору динаміки рідинних ракетних рухових установок (ЖРДУ) (1964). Брав безпосередню участь у створенні та експериментальному відпрацюванні ряду зразків ракетної техніки бойового та космічного призначення. У 1966 році перейшов на роботу в сектор проблем технічної механіки Дніпропетровської філії Інституту механіки АН УРСР (з 1968 р. – Дніпропетровське відділення Інституту механіки АН УРСР): старший науковий співробітник відділу теплових процесів у двигунах літальних апаратів (19). Створив та очолив відділ динаміки рухових установок літальних апаратів (з 1970 р.). Заступник керівника (1970-1972, 1977-1978) та керівник Дніпропетровського відділення Інституту механіки АН УРСР (1978-1980), яке набуло статусу самостійного інституту (1980) – Інституту технічної механіки АН УРСР Академії наук України та Національного космічного агентства України). Директор цього інституту (1980 – 2003), з 2003 – почесний директор.

Його основна наукова та виробнича діяльність пов'язана з розробками в галузі динаміки ЖРДУ та складних гідромеханічних систем. Запропонував нові методи розрахунку теплових режимів у елементах конструкцій літальних апаратів. Розробив методологію теоретичного аналізу аварійних ситуацій у ЖРДУ. Виконав теоретичні та експериментальні дослідження динаміки кавітаційних явищ у шнековідцентрових

насосах рідинних ракетних двигунів, що дозволили йому сформулювати нові уявлення про динамічні процеси в ЖРДУ. Створив теорію низькочастотних кавітаційних автоколивань у насосних системах живлення ЖРДУ та розробив ефективні способи та засоби усунення таких автоколивань. Вирішив низку проблемних питань динаміки ЖРДУ, у тому числі пов'язаних з математичним моделюванням процесу запуску двигуна з урахуванням кавітаційних явищ у шнековідцентрових насосах. Розвинув лінійну теорію поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв (РН) та створив нелінійну теорію поздовжніх коливань рідинних РН. Розробив теоретичні методи аналізу динамічної сумісності ЖРДУ із конструкцією РН.

Запропонував ефективні демпфуючі пристрої нових класів для забезпечення поздовжньої стійкості рідинних РН та пневматичних систем віброзахисту космічних апаратів. Розробив та впровадив у практику нові перспективні екологічно чисті технології та пристрої для кавітаційно-імпульсної гідроабразивної обробки різних поверхонь, у тому числі металевих поверхонь ракетних конструкцій. Автор та співавтор понад 300 наукових праць, у тому числі 3 монографій та 90 винаходів. Професор кафедри двигунобудування на фізико-технічному факультеті ДДУ (1970–1978). Депутат Верховної Ради УРСР, член комісії Верховної Ради УРСР з питань науки і техніки (1985-1990). Член Президії НАНУ, голова Придніпровського наукового центру НАНУ (з 1985р.), академік-секретар Відділення механіки НАНУ (з 1993 р.). Член Американського товариства інженерів-механіків (1995), президент Українського товариства інженерів-механіків (з 1994 р.), академік академії космонавтики ім. К.Е. Ціолковського (1996), член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики Ордену Трудового Червоного Прапора (1976), Жовтневої революції (1982), князя Ярослава Мудрого V та IV ступенів (1995, 1998). Премія НАН України ім. М.К.Янгеля (1983). Державна премія СРСР (1990). Державна премія України у галузі науки і техніки (1997). Заслужений діяч науки та техніки України (2001).

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 наукової 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 (2001-2025 роки) зроблено більш ніж 3600 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.

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПОВЗУЧОСТІ

В. П. Пошивалов

Інститут технічної механіки НАН і ДКА України, vposhivalov@gmail.com

На підставі системи кінетичних рівнянь Ю. М. Работнова запропоновано підхід до прогнозування довговічності конструкційних матеріалів при повзучості в умовах одновісного стаціонарного навантаження.

Розроблено стохастичну модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка дозволяє за заданими значеннями напруження, температури та результатами експериментальних досліджень на повзучість матеріалу визначати ймовірнісний розподіл його часу до руйнування.

Розроблено методику ідентифікації сталих повзучості матеріалу, яка базується на статистичній обробці сімейства експериментальних кривих повзучості та використанні методів лінійного та нелінійного регресійного аналізу.

За відомими експериментальними даними на повзучість зразків з корозійностійкої сталі 12X18H10T та зразків з алюмінієвого сплаву РА6 проведено розрахунки основних ймовірнісних характеристик розподілу часу до руйнування. Проведена перевірка на адекватність розроблених стохастичних моделей процесам руйнування при повзучості. Показано, що теоретичні розрахунки добре узгоджуються з експериментальними даними по тривалій міцності для обох матеріалів, як за часом до руйнування, так і за його середньоквадратичним відхиленням.

Розроблено стохастичний метод базових діаграм, який застосовується для екстраполяції часу до руйнування конструкційних матеріалів при повзучості на терміни служби, які на декілька порядків перевищують тривалість експериментів. За відомими експериментальними даними на тривалу міцність зразків зі сталі 18Cr-8Ni проведено розрахунки основних ймовірнісних характеристик розподілу напруження при фіксованій довговічності. Перевірено на адекватність розроблений метод екстраполяції часу до руйнування при повзучості по експериментальним даним довготривалої міцності зразків зі сталі 18Cr-8Ni.

Література

1. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Стохастическая модель разрушения конструкционных материалов при неизотермической ползучести. *Вестник Запорожского национального университета. Математическое моделирование и прикладная механика: сборник научных трудов.* 2015. № 1. С. 154 – 162.
2. Doyar I., Poshivalov V. Development of a stochastic model of failure of structural materials in creep at hardening stage. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2016. № 3 (5). С. 25–31.
3. Пошивалов В. П. Визначення часу руйнування в умовах повзучості при нелінійних накопиченнях пошкоджень / В. П. Пошивалов // *Технічна механіка.* – 2022. – № 1. – С. 36 – 41.
4. Пошивалов В. П. Ймовірнісна модель довготривалої міцності конструкційних матеріалів на основі кінетичної теорії / В. П. Пошивалов // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій.* – 2022. – Вип. 35. – С. 73 – 83.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ПОХИБОК ВХІДНИХ ДАНИХ

А.П. Дзюба¹, 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 міцності 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.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НОВОЇ ТЕХНІКИ В ПРОЦЕСАХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

М. Бабешко, В. Савченко, С. Склепус, П. Стебляк

Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна, e-mail:

bab41@ukr.net

Створено математичні моделі непружного деформування елементів конструкцій у вигляді просторових тіл та оболонок обертання, гнучких пологих оболонок складної форми в плані, нестационарного стану пластин та оболонок в процесах неізотермічного навантаження. Враховується залежність властивостей матеріалів від температури, виду напруженого стану, пластичного розпушення та історії навантаження.

Застосування математичних моделей процесів деформування елементів конструкцій різного призначення у вигляді просторових та тонкостінних тіл з урахуванням реальних властивостей матеріалів під дією термосилових навантажень полегшує та прискорює проектування і виготовлення конструкцій, тому створення відповідних моделей є актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла.

Побудовано математичні моделі для визначення термопружнопластичного стану елементів конструкцій у вигляді шаруватих тіл та тонких оболонок обертання при неосесиметричному термосиловому навантаженні з оцінкою їх міцності. Використовуються визначальні рівняння, які описують деформування ізотропного матеріалу вздовж траєкторій малої кривизни і враховують залежність властивостей матеріалу від температури, виду напруженого стану, пластичного розпушення та історії навантаження [1,2]. Рівняння містять дві нелінійні залежності - між першими інваріантами тензорів напруження і деформації та між другими інваріантами відповідних девіаторів; вид напруженого стану враховується шляхом використання параметра, який обчислюється через другий і третій інваріанти девіатора напружень.

Нелінійні визначальні рівняння лінеаризовано методом додаткових напружень. На основі цих визначальних рівнянь розроблено методику чисельного дослідження напружено-деформованого стану осесиметричних елементів конструкцій в процесах неосесиметричного термосилового навантаження. Задача розв'язується поетапно в процесі послідовних наближень в рамках малих деформацій з використанням для оболонок гіпотез Кірхгофа – Лява, а просторова задача – в варіаційній постановці з використанням методу скінченних елементів. Використано представлення навантажень та невідомих функцій в тригонометричні ряди по коловій координаті. Сформульовано системи розв'язувальних рівнянь для знаходження коефіцієнтів тригонометричних

рядів невідомих функцій; праві частини рівнянь визначаються з використанням результатів, одержаних на попередньому наближенні. В кожному наближенні задача теорії оболонок зводиться до рішення крайової задачі для систем восьми звичайних диференціальних рівнянь, з використанням методу Рунге – Кутта з дискретною ортогоналізацією, а просторова задача – до розв’язання систем алгебраїчних рівнянь, порядок яких залежить від кількості скінчених елементів, з використанням методу Гауса.

На конкретних прикладах показано, що врахування виду напруженого стану приводить до істотного перерозподілу компонентів напружень та деформацій. Вперше виконана оцінка впливу розпушення в крайовій задачі пластичності.

Розроблено новий чисельно-аналітичний метод розв’язання задач фізично нелінійного деформування гнучких пологих оболонок складної форми із матеріалів з характеристиками, що залежать від виду напруженого стану [3,4]. Метод базується на використанні методів R-функцій, Рітца, неперервного продовження розв’язку за параметром та Рунге–Кутта–Мерсона. Розв’язано тестову задачу, отримано збіг з просторовим розв’язком. Розв’язано задачі нелінійного деформування конкретних оболонок. Досліджено вплив напрямку зовнішнього навантаження, геометричної форми й умов закріплення на напружено-деформований стан. Показано, що неврахування різної поведінки матеріалу за розтягу та стиску призводить до суттєвих похибок у результатах розрахунку компонентів напружень і деформацій.

Запропоновано новий варіант [5,6] методу розрахунків нестационарного термопластичного напружено-деформованого стану просторових тіл та оболонок при неізотермічних процесах навантаження по траєкторіях малої кривизни, який відрізняється від існуючих методів вищою точністю та дає третій порядок точності методу за просторовими координатами. Враховується як вид напруженого стану, так і можливе розпушення матеріалу в процесі роботи конструкції. Отримано вирази для двовимірного B-сплайну третього порядку та двовимірного напруженого сплайну, які можуть застосовуватися як для апроксимації диференціальних операторів повної системи рівнянь у частинних похідних, так і використовуватися для отримання інтерполяційних значень функцій з четвертим і відповідно п’ятим порядком точності по координатах між вузлами.

Використання розроблених методів дозволяє детальніше дослідити стан елементів конструкцій, оцінити структуру матеріалу при робочих та екстремальних навантаженнях, зменшити їх матеріалоемність та прогнозувати ресурс при різних режимах роботи.

1. Shevchenko Yu.N., Terekhov R.G., Tormakhov N.N. (2007) Elastoplastic Deformation of Elements of an Isotropic Solid along Paths of Small Curvature: Constitutive Equations Incorporating the Stress Mode // *Int. Appl. Mech.* – **43**, N 6. – P. 621–630.
2. [Babeshko M., Galishin A., Savchenko V., and Tormakhov M. \(2023\). Thermoviscoplasticity Equations of Isotropic Material with Stress Mode Dependence // Advances in Mechanics. Current Research Results of the NAS of Ukraine Editors: Aleksander N. Guz·Holm Altenbach, Viacheslav Bogdanov, Vladimir M. Nazarenko / ISSN 1869-8433 ISSN 1869-8441 \(electronic\) Advanced Structured Materials P. 21-38. ISBN 978-3-031-37312-1 ISBN 978-3-031-37313-8 \(eBook\) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8>](#)
3. Галішкін О.З., Склепус С.М. (2024). Нелінійне деформування гнучких пологих оболонок складної форми з матеріалів, неоднаково опірних розтягу та стиску // *Проблеми міцності.* – №1. – С. 41-51.

4. Sklepus S.M. (2023). Bending of plates with complex shape made from materials that differently resist to tension and compression // Journal of Mechanical Engineering. – Vol. 26, №2. – P. 16-23.
5. Steblyanko P. A., Shevchenko Yu. N. (2007). Calculation of temperature non-stationary stress - strained state of composite shells on the basis of combined 2D model with 3D elements// TS2007-7th International Congress on Thermal Stresses Related Topics, June 4-7, 2007. Taipei, Taiwan. - P. 647-650.
6. Steblyanko P.A., Shevchenko Yu.N. (2014). Computational Methods in Stationary and Nonstationary 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.

ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У СТАЛЕВИХ ТІЛАХ ПРИ НАГРІВІ

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

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

У зонах термічного впливу при локальній термообробці тонких маловуглецевих низьколегованих сталевих пластин можуть виникати залишкові напруження від яких суттєво залежать кінцеві функціональні та міцнісні властивості інженерних виробів. Актуальною є розробка методики визначення просторово неоднорідного фазового складу при охолодженні та, обумовлених ним, залишкових напружень у тонких сталевих пластинах за нагріву рухомими розподіленими джерелами тепла, а також їх оптимізація з метою отримання певних механічних властивостей цих пластин для подальшої їх експлуатації.

Для визначення залишкових напружень, необхідно мати відомі значення об'ємної залишкової деформації, які пов'язані з питомими об'ємами основних фазових складових, що утворюються при нагріві – охолодженні розглянутих сталевих тіл.

Задачу про знаходження залишкових деформацій сформульовано на основі підходу методу умовних залишкових деформацій при відомій деформації фазових складових [1].

Розглядаються питання пов'язані з коректним обчисленням з достатньою точністю значень питомих об'ємів фазових складових, що утворюються при розпаді аустеніту на ферито-перліт, бейніт і мартенсит. Відома велика кількість даних, у тому числі експериментального характеру, про значення питомих об'ємів основних фазових складових, що утворюються при розпаді аустеніту в діапазоні температур поліморфних перетворень. Також є відомі експериментальні дані про збільшення в окремих випадках об'єму для сталі при перетворенні (розпаді аустеніту) рівному 0,1% на кожні 0,1% вуглецю. На підставі аналізу наявних експериментальних даних про значення питомих об'ємів встановлено, що для розглянутих у моделі, описаній в роботі [1], типів сталей при монотонному охолодженні нижче 500⁰С практично не змінюється розподіл відсоткового вмісту основних фазових складових, що утворилися. Залишкові напруження визначаються такими відсотковими вмістами та значеннями питомих об'ємів у нормалізованому стані (приведеному до температури 20⁰С). При цьому, при незмінності відсоткового вмісту фазових складових, що утворилися, значення питомих

об'ємів при охолодженні від 500°C до 20°C змінюються істотно. Тому на цьому температурному проміжку структурні напруження матимуть характер тимчасових напружень, визначених миттєвими значеннями тільки питомих об'ємів фазових складових (при наявному незмінному їх відсотковому вмісті, що встановився при охолодженні до 500°C). Вони істотно залежать від вмісту вуглецю і температури, та будуть асимптотично прямувати до значень залишкових напружень при зниженні температури до натуральної.

Зазначимо, що така поведінка залишкових напружень залежно від температури може бути врахована у вихідній моделі, тобто ми можемо досліджувати у такому розумінні тимчасові структурні напруження, які зі зменшенням температури перетворюються на залишкові.

1. *О.Гачкевич, Т.Козакевич, Р.Кушнір* Вибрані математичні проблеми термомеханіки маловуглецевих низьколегованих сталевих пластин при нагріві рухомими джерелами тепла за врахування структурних залишкових деформацій. Праці Наукового товариства ім. Шевченка. Львів-2023, - Т. LXXIV, - С.81-98 (230 с.)

STABILITY OF IDEAL FLUID MOTION IN SHELL STRUCTURES

Chondhary N^{1.}, Sierikova O.^{2.}, Strelnikova O.^{3.}, Kolodiaznyi A.^{3.}

¹*Bennet University, Delhi, Republica of India*

²*National University of Civil Protection of Ukraine,*

³*A.M. Podgorny Institute of Power Machines and Systems,*

⁴*Kharkiv National University of Radio Electronics*

This study investigates the stability of fluid motion in shells of revolution under the influence of intense periodic loading. It is assumed that the fluid inside the shell is inviscid and incompressible, and that its motion, caused by the applied loads, is irrotational. Under these conditions, a velocity potential Φ exists. To determine this potential, a mixed boundary value problem for the Laplace equation is formulated. The boundary conditions for this problem in the fluid domain Ω include the impermeability condition on the wetted surfaces of the shell structure S_1 , as well as the static and dynamic conditions on the free fluid surface S_0 . [1]. The implementation of the dynamic boundary condition leads to a system of differential equations, specifically a system of Mathieu equations with respect to the coefficients depended on time only. The stability of the solution is investigated, and zones and parameters of unstable motion are identified using the Ince–Strutt diagram [2].

Mathematical models have been developed to analyse the stability of fluid vibrations in tanks and fuel reservoirs. These models are based on the application of potential theory and singular integral equations. To solve the singular equations, an efficient numerical method is used, which involves their reduction to one-dimensional form and the use of properties of generalized elliptic integrals. A system of differential equations is constructed, for which the conditions of solution stability are analyzed. This made it possible to determine the parameter ranges of loading that may lead to unstable behaviour of the structure.

References

1. 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, Vol. 1068. P. 223-229. DOI:10.4028/P-888232.

2. Medvedovskaya T. Strelnikova E., Medvedyeva K. Free Hydroelastic Vibrations of Hydroturbine Head Covers Intern. *J. Eng. and Advanced Research Technology (IJEART)*. 2015, Vol. 1, No 1. P. 45–50. DOI: 10.13140/RG.2.1.3527.4961

COMPUTER MODELING OF HYDROELASTIC VIBRATIONS OF A BLADE UNDER FUZZY LOADING CONDITIONS

Murawski K.¹, Degtyarev K.G.², Korneichuk M.T.³, Sierikova O.M.⁴, Strelnikova O.O.^{2,3}

¹*Zelena Gora University, Poland*

²*A.M. Pidhorny Institute of Power Machines and Systems,*

³*V.N. Karazin Kharkiv National University,*

⁴*National University of Civil Protection of Ukraine*

Modern engineering equipment operates under significant service loads, including intense mechanical forces and elevated temperatures. Such operating conditions impose strict requirements on the strength and reliability of structural components. A major challenge in such analyses lies in the difficulty of accurately defining the parameters of external loading acting on the structure. Often, these parameters are uncertain or variable, necessitating the inclusion of uncertainties in the mathematical modelling [1]. This work proposes an effective approach for analysing hydro-elastic vibrations of a blade in a reversible-blade hydraulic turbine. The method combines potential flow theory for describing fluid motion with elements of fuzzy logic. At the initial stage, the problem of forced vibrations is solved within a deterministic framework. The fluid is modelled as ideal (i.e., inviscid) and incompressible, and its motion induced by small oscillations of the elastic element is assumed to be irrotational. This allows the introduction of a fluid velocity potential $\Phi(x,y,z,t)$, which satisfies Laplace's equation. To solve the problem, the given normal modes method is used [2]. The blade's vibrations are represented as a combination of its natural modes, neglecting the influence of the added mass of the fluid. The fluid pressure on the surface of the blade is determined by solving a hypersingular integral equation, obtained by representing the unknown velocity potential using a double-layer potential. The numerical solution of this hypersingular equation is performed using the boundary element method. Then loading parameters were fuzzified.

1. Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O. and Strelnikova E., Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs, *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, P. 1-6, DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466

2. Degtyarev, K., Glushich, P., Gnitko, V., Strelnikova, E. Numerical Simulation of Free Liquid Induced Vibrations in Elastic Shells, *International Journal of Modern Physics and Applications*. Vol. 1, No. 4, 2015, P. 159- 168, DOI: 10.13140/RG.2.1.1857.5209.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОФОРМУВАННЯ

Я.О. Жук, М.М. Мельниченко, В.О. Гусак

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України*

Запропоновано чисельну модель для моделювання процесу лазерного термоформування (LTF). Вона розроблена на основі термодинамічно узгодженої теорії зв'язаної термов'язкопластичності і придатна для моделювання ЛТФ тонкостінних металевих елементів конструкцій. Для опису поведінки матеріалу використовується узагальнена модель фізично нелінійної температурно-залежної термов'язкопластичності. Просторову дискретизацію осесиметричної задачі лазерного імпульсного навантаження диска виконано за допомогою МСЕ. Змодельовано нестационарний процес LTF деформованої конфігурації диска. Кінцевий профіль диска отримано в результаті термоіндукованого залишкового напружено-деформованого стану, спричиненого швидким нагріванням і подальшим поступовим охолодженням матеріалу під ділянкою лазерного опромінення.

Короткоімпульсний лазерний промінь може бути використаний для виготовлення мікророзмірних деталей, таких як деталі MEMS. Використання LTF виглядає особливо перспективним у виробництві MEMS, де жорсткі вимоги до технології виробництва диктують високу точність позиціонування і високу відтворюваність у поєднанні з низькими виробничими витратами.

Розробка адекватної моделі для зв'язаної термопружно-в'язкопластичної реакції матеріалу в умовах технології LTF продовжує залишатися актуальною проблемою.

Дана робота присвячена проблемі розробки та коректного застосування термомеханічної постановки задачі, придатної для моделювання LTF-процесу. Новизна запропонованого підходу полягає в тому, що взаємодія теплового імпульсу з елементом конструкції досліджується з використанням динамічної постановки задачі із застосуванням узагальненої моделі фізично нелінійної поведінки матеріалів у широкому діапазоні температур, що узгоджується з термодинамікою незворотних процесів. В рамках розробленої нової постановки задачі змодельовано процес лазерного термоформування та досліджено вплив теплового імпульсу, прикладеного в центрі металевого диска. Детально досліджено нестационарний процес формування відхиленої конфігурації диска внаслідок залишкового напружено-деформованого стану, спричиненого термічними деформаціями, що виникають під час швидкого нагрівання матеріалу під лазерною плямою і подальшого поступового охолодження тіла.

Використовується осесиметрична постановка задачі для металевого диску. Формулювання динамічної осесиметричної зв'язаної задачі термов'язкопластичності складається з кінематичних рівнянь (для малих прогинів), рівнянь динамічної рівноваги/руху в термінах тензора напружень Коші, рівняння балансу енергії, зведеного до рівняння теплопровідності, граничних і початкових механічних і теплових умов. Як матеріал диску вибрано сталь 35ХМА.

Отримана постановка задачі є суттєво нелінійною і розв'язується чисельно. Для цього використовується підхід, розвинений для розв'язання динамічних плоских і осесиметричних задач термов'язкопластичності.

Чисельна реалізація задачі проводиться у рамках подвійного ітераційного процесу. Перший – внутрішній – пов'язаний з інтегруванням системи нелінійних рівнянь моделі поведінки матеріалу з використанням неявної схеми, другий – зовнішній – з розв'язанням рівнянь руху і теплопровідності. В його рамках враховується

температурна залежність констант матеріалу і параметрів моделі Боднера – Партома. Наявність областей швидкої зміни розв'язку при переході від пружного деформування до пластичного вимагає застосування схем із змінним кроком інтегрування в часі. Рівняння еволюції інтегруються неявним методом Ейлера з використанням правила «середньої точки». Система нелінійних трансцендентних рівнянь, яка виникає на кожному кроці за часом, розв'язується методом простої ітерації. Для прискорення збіжності використовується процедура Стефенса-Ейткена.

Просторова дискретизація задачі проводиться за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ). Розрахунки проводились для дрібної сітки, особливо в області опромінення, для коректного моделювання термомеханічної поведінки, зумовленої великими температурними градієнтами. Параметри сітки вибирались за допомогою практичного критерію збіжності розв'язків.

Розроблена постановка задачі та метод її розв'язання далі застосовані для дослідження можливостей техніки опромінення елементів конструкцій короткими тепловими імпульсами з метою штампування або формування бажаного профілю (конфігурації). В основі цієї техніки лежить методика модифікації кривизни поверхні металевих пластин, оболонок і елементів конструкцій за допомогою теплових залишкових деформацій без використання зовнішнього силового навантаження.

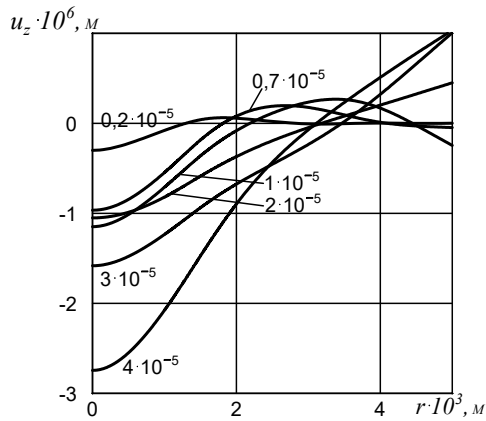


Рис. 1

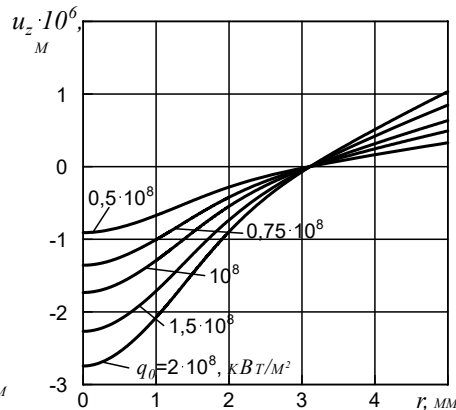


Рис. 2

Результати такого дослідження представлені на рисунках.

На рис. 1 представлена еволюція переміщень точок поверхні диска, що опромінюється. Моменти часу, які відповідають кожній кривій, вказані цифрами. Криві представляють собою розв'язки задачі для вільного контуру диска. Максимальні прогини спостерігаються в центрі диска. На рис. 2 показані залишкові прогини при дії імпульсів різної інтенсивності. При збільшенні параметра теплового потоку переміщення збільшуються. Максимальний прогин завжди спостерігається в центрі, причому край диска переміщується в протилежному напрямі.

Отримані кількісні та якісні результати моделювання лазерного термоформування листових металевих деталей показують, що основним механізмом формозміни є створення лазерно-індукованих термічних залишкових непружних деформацій. Досліджено еволюцію полів непружних деформацій в диску, залежність розподілу залишкових непружних деформацій по радіусу і товщині диска, вплив рівня лазерного теплового випромінювання на величини індукованих прогинів, а також вплив умов закріплення контуру диска на ефективність термоформування. Виявлено, що більшої варіації профілю диска можна досягти, коли край диска вільний.

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ І РУЙНУВАННЯ НЕПРУЖНИХ ТІЛ ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.П.Пошивалов¹, Ю.А.Черняков², П.О.Стеблянко³

¹*Інститут технічної механіки НАН і ДКА України, vpshivalov@gmail.com*

²*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна,
yu.chernyakov@gmail.com*

³*Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, caf-ymi@ukr.net*

В'язке руйнування пов'язане з накопиченням мікропошкоджень – появою нових мікропор і збільшенням їх розмірів. Коли число мікродефектів досягає критичної позначки, виникає лавиноподібний потік злиття мікродефектів в макротріщини і макропори, які призводять до руйнування тіла. Процеси виникнення мікродефектів протікають приховано, а їх інтенсивність і спрямованість можна оцінити лише опосередковано. Тому теоретичні конструкції, спрямовані на вивчення пошкоджень, набувають особливої ролі.

В'язке руйнування супроводжується значною пластичною деформацією. При цьому відбувається взаємний вплив процесів пластичної деформації і накопичення пошкоджень. Питання їх взаємин вимагають ретельного вивчення, і практично не представлені в літературі.

Робота присвячена розробці нових математичних методів опису процесів накопичення та розвитку пошкоджень мікронеоднорідних та функціональних матеріалів у процесі пластичної деформації при складних траєкторіях навантаження. Проведена розробка теоретичних методів обліку накопичення об'ємної пластичної деформації (пластичного розпушення) при циклічних деформаційних процесах. Для врахування втомного руйнування застосовано критерій міцності Новожилова в рамках теорії мікродеформацій при складних траєкторіях навантаження. Здійснена постановка зв'язаної задачі пластичність–пошкодження для врахування змін пружних властивостей матеріалу в процесі пластичної деформації.

Розроблено варіант теорії мікродеформацій, який здатний адекватно описати пластичне розпушення матеріалу з урахуванням впливу гідростатичного тиску. Показано, що застосування критерію втомної міцності Новожилова в рамках розробленого варіанту теорії мікродеформацій дозволяє адекватно описати втомну довговічність матеріалів при комплексних навантаженнях.

ВПЛИВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ПРУЖНОСТЕЙ КРИПЛЕННЯ НАГРІТОЇ КРУГЛОЇ ПЛАСТИНКИ НА ЇЇ ВІБРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

О.М. Горечко, Н.О. Заводовська

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

Пластини широко використовуються в якості конструктивного елемента у багатьох галузях сучасної техніки і технологіях. Найбільша увага в теоретичних дослідженнях ще з кінця дев'ятнадцятого століття зверталась на прямокутні та круглі

пластинки. Зокрема круглі пластини при дії динамічних навантажень досліджувались [1] найчастіше в рамках теорії пластин Кірхофа при ідеальних граничних умовах (вільний, опертий та зацемлений край). Рідше брались до уваги варіанти податливого кріплення [2]. Одним із напрямків сучасних теоретичних досліджень вібрацій круглих пластин є аналіз впливу попередніх напружень в площині пластини на динамічні характеристики її поперечних коливань.

В даній роботі розглядається задача аналізу вібраційних характеристик поперечних коливань круглої пластини при її навантаженні в площині осесиметричним полем температурних напружень. Напруження викликані нагрівом рівномірно розподіленим джерелом тепла при теплообміні з середовищем за законом Ньютона при пружній податливості кріплення контура відносно радіальних переміщень, повороту та нормальних переміщень. Задача зводиться до послідовного розв'язування задач осесиметричної статичної термопружності та поперечних коливань пластинки при наявності температурних напружень в її площині.

Ґрунтуючись на загальному розв'язку статичної задачі термопружності в осесиметричному випадку [3] записано вирази температури і напружень при пружному кріпленні краю, постійних коефіцієнтах теплообміну з навколишнім середовищем і інтенсивності джерел тепла. Ці вирази містять комбінації функцій Бесселя першого роду та вироджених гіпергеометричних функцій. Найпростіші вирази у вигляді постійних температурних напружень отримуються у випадку однорідної температури пластинки. Задача поперечних коливань пластинки Кірхофа формулюється для осесиметричного поля температурних напружень при пружному кріпленні контура відносно повороту та нормальних переміщень. Аналітичний розв'язок цієї задачі будується тільки для випадку постійних температурних напружень. У більшості практично важливих випадків власні частоти шукаються числово методом скінчених елементів.

В результаті проведених обчислень оцінено точність обчислень для випадків кріплень, близьких до класичних ідеальних варіантів зацемлення та опирання. Проаналізовано вплив пружності кріплення та коефіцієнтів теплообміну пластинки з зовнішнім середовищем на нижчі власні частоти. Показано, що основний вплив на власні частоти має жорсткість кріплення на поворот. Встановлено діапазони значень коефіцієнтів тепловіддачі з зовнішнього контура та плоских поверхонь, в яких вони найбільше впливають на зміну власних частот.

1. *Leissa A.W.* Vibration of Plates. –NASA SP-160.– Washington: NASA, 1969.– 353 p.
2. *Zagrai A., Donskoy D.* A “soft table” for the natural frequencies and modal parameters of uniform circular plates with elastic edge support // *Journal of Sound and Vibration.* – 2005. – 287(1-2). – P.343-351. – <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.01.021>
3. *Коваленко А.Д.* Термоупругость. Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.

ЗАДАЧА ПРО ВДАВЛЮВАННЯ ШТАМПА З ЧАСТКОВИМ ПРОКОВЗУВАННЯМ В КРИВОЛІНІЙНУ АНІЗОТРОПНУ ПЛАСТИНУ

Т.С.Кагадій¹, І.В. Щербина², А.Г.Шпорта¹

¹НТУ «Дніпровська політехніка».

²Дніпровський аграрно-економічний університет

Моделювання контактної взаємодії плоских штампів та анізотропних пластин з урахуванням зон ковзання та зчеплення наближає до реальних задач, що виникають на практиці при дослідженні взаємодії деталей конструкцій. Порівняння результатів, отриманих різними методами (чисельними, аналітичними, чисельно-аналітичними) дозволяє оцінити межі застосування тої чи іншої моделі, дає змогу підвищити якість та надійності виробів з анізотропних матеріалів. Розуміння впливу анізотропії на механічні властивості матеріалів відкриває перспективи для більш оптимального підбору матеріалів та конструкцій, а врахування часткового ковзання, відшарування та інших процесів забезпечує надійність контактуючих механізмів.

Метою цієї роботи є аналіз напружено-деформованого стану скінченної пружної анізотропної пластини, що має форму зрізаного криволінійного сектора, під впливом жорсткого штампа. Особлива увага приділяється вивченню зон ковзання та зчеплення, що виникають у процесі деформації. Аналіз цих зон дозволяє краще зрозуміти механізм деформації та руйнування матеріалів, що є критично важливим для прогнозування їхньої поведінки в умовах експлуатації.

Пружна пластина закріплена за кромками. На границю меншого радіуса на обмеженій ділянці діє жорсткий штамп, навантажений нормальним зусиллям (штамп переміщується поступально). Інша межа, більшого радіуса, залишається вільною. Припускається, що в області контакту штампа з пластиною існують дві ділянки ковзання, що примикають до кінцевих точок області контакту, та ділянка зчеплення, розташована між ними. У зонах ковзання зсувні зусилля направлені у протилежні боки. Межові точки ділянки зчеплення, що заздалегідь не відомі та повинні бути визначені у ході розв'язання задачі, розташовані симетрично відносно осі. Напруження в цих точках повинні бути обмежені та неперервні. Пластина працює в умовах узагальненого плоского напруженого стану. Матеріал її є ортотропним, головні напрямки анізотропії співпадають з полярними координатами. Потрібно визначити закони розподілу напружень під штампом і розмір ділянки зчеплення.

Для математичного опису поставленої задачі використовуються фундаментальні рівняння рівноваги та співвідношення Коші. Ці рівняння встановлюють зв'язок між напруженнями, деформаціями та переміщеннями в матеріалі пластини.

Розв'язання складної крайової задачі проводиться методом збурень. Цей метод передбачає введення малого параметра, який визначається як відношення фізичних характеристик матеріалу. За допомогою цього параметра вдається розкласти вихідні рівняння на простіші складові, що полегшує їх аналіз.

Розв'язок шукається у вигляді суперпозиції результатів двох типів. Кожен з цих типів напружено-деформованого стану містить основну та допоміжну функції. Невідомі функції визначаються за допомогою розкладання в ряди за малим параметром.

На кожному етапі наближення основні функції знаходяться з рівнянь Лапласа, а допоміжні – за допомогою інтегрування. Такий підхід дозволяє отримати аналітичний розв'язок задачі з необхідною точністю.

Особлива увага приділяється аналізу крайових умов, що виникають на межах пластини та в зоні контакту зі штампом. Цей аналіз показує, що крайові умови

практично завжди можуть бути сформульовані для основних функцій, що спрощує процес розв'язання.

У результаті дослідження отримано розподіл напружень під штампом та визначено розмір зони контакту. Ці результати дозволяють оцінити вплив анізотропних властивостей матеріалу на механічний стан пластини. Зокрема, зміна кута зрізу або розподілу матеріальних характеристик може призвести до значних варіацій у напруженнях. Це особливо важливо для практичного застосування, де точність прогнозу напружено-деформованого стану є критично важливою для забезпечення надійності конструкцій. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів формування деталей з анізотропних матеріалів, а також для розроблення нових матеріалів, що поєднують потрібні механічні властивості.

Література

1. Кагадій Т.С., Шпорта А.Г., Білова О.В., Щербина І.В. Математичне моделювання в задачах геометрично нелінійної теорії пружності. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2021. Т. 4, №1. С. 103–110. <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.11>
2. Кагадій Т.С., Щербина І.В. Застосування аналітичних підходів до розв'язання задач теорії пружності з урахуванням криволінійної анізотропії матеріалу. *Current aspects of the development of physical and mathematical sciences in the era of digitalization: scientific monograph*. – Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. С. 56-111.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА КОНТАКТНУ ЗОНУ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛАХ

О.Д. Онопрієнко, В.Б. Говоруха

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Розглянуто задачу про міжфазну тріщину між двома різнорідними п'єзоелектричними тілами при зовнішньому електромеханічному навантаженні. Тріщина вважається електропровідною, тобто на її берегах підтримується однаковий електричний потенціал. Відомо, що для двох різнорідних матеріалів класична модель тріщини дає осциляційну особливість полів біля її вершин. Така особливість не лише ускладнює аналіз, але й призводить до нереальних фізичних наслідків (взаємне проникнення берегів тріщини). Тому актуальною є побудова моделей, які усувають цей недолік та коректно описують поведінку тріщини в п'єзоелектричних біматеріалах.

Для усунення осциляційної особливості застосовано контактну модель, в якій біля вершин тріщини припускається гладкий (без тертя) контакт її берегів. У зоні контакту також враховується електричне поле. Такий підхід дозволяє успішно усунути осцилюючу особливість напружень і електричного поля в околі вершин тріщини.

В рамках цієї моделі розв'язок задачі зводиться до системи сингулярних рівнянь або еквівалентної крайової задачі Діріхле-Рімана, для якої знайдено точний аналітичний розв'язок. На границі поділу «відкрита тріщина – зона контакту» виконуються умови плавного змикання берегів тріщини. Ці умови дозволяють визначити невідому довжину контактної зони.

Електричне поле суттєво впливає на довжину контактної зони та параметри руйнування міжфазної тріщини. Збільшення напруженості зовнішнього електричного поля (або еквівалентно, поверхневої густини заряду/електричного зміщення) може призвести до розширення контактної зони, що, у свою чергу, зменшить довжину відкритої частини тріщини. Це відбувається у випадку, коли електричне поле поляризоване так, що викликає додаткове притискання берегів тріщини, тобто створює ефект стискаючих напружень на інтерфейсі. Натомість зміна полярності електричного поля на протилежну може зменшити довжину контактної зони – електричні сили починають «розштовхувати» береги тріщини, сприяючи її відкриттю. При достатньо великому електричному полі контактна зона може взагалі зникнути, і тріщина стає повністю розкритою. Таким чином, електричне навантаження виступає як важливий важіль, який може суттєво вплинути на процеси руйнування міжфазної тріщини.

Отримані результати демонструють, що контрольоване електричне поле є дієвим засобом регулювання поведінки міжфазної тріщини в п'єзоелектричних біматеріалах. Застосування контактної моделі (з урахуванням електричного поля в замкненій частині) дозволяє усунути фізично нереальні особливості розв'язку та адекватно прогнозувати вплив електромеханічних навантажень на тріщину. Збільшуючи чи зменшуючи напруженість електричного поля, можна відповідно «закривати» або «відкривати» тріщину, тим самим змінюючи енерговиділення на її вершинах і коефіцієнти інтенсивності напружень. Це важливо для практики, оскільки відкривається можливість керувати тріщиностійкістю композиційних п'єзоелектричних матеріалів та запобігати розвитку розшарувань шляхом зовнішнього електричного впливу. Таким чином, електричне поле виступає як інструмент тонкого налаштування механіки руйнування тріщини між двома різнорідними п'єзоелектричними тілами, що має значення для створення «розумних» конструкцій з керованими властивостями руйнування.

УМОВИ ІСНУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ МОД ЛЕМБА У ГІДРОПРУЖНОМУ ХВИЛЕВОДІ

О.М. Багно, Г.І. Щурук

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Значне практичне використання акустичних хвиль вимагає застосування моделей, які більш повно враховують властивості реальних середовищ. У зв'язку з цим актуальним є при дослідженні хвильових процесів залучення моделі в'язкої стисливої рідини.

У даній роботі для дослідження поширення хвиль у системі, що складається з пружного шару та півпростору рідини, залучаються моделі, основані на використанні тривимірних лінеаризованих рівнянь Нав'є-Стокса для рідини та лінійних рівнянь теорії пружності для твердого тіла. Обрані постановки задач і метод, основані на застосуванні представлень загальних розв'язків рівнянь руху в'язкої стисливої рідини і пружного тіла, запропоновані в роботах [1, 2].

Як відомо, фазова швидкість і структура хвиль при взаємодії пружного тіла та рідини залежать від механічних параметрів гідропружної системи та визначаються співвідношеннями між ними. У системі, компонентами якої є пружний шар і півпростір рідини, таким співвідношенням може слугувати співвідношення між швидкістю звукової хвилі в рідині a_0 і швидкістю квазірелеївської хвилі c_R у пружному шарі. У

роботі встановлено, що при $a_0 > c_R$ в гідропружній системі рідина не перешкоджає енергетичному обміну між поверхнями податливого пружного шару (взаємодії об'ємної та зсувної хвиль на них), що сприяє виникненню в гідропружній системі нормальних квазілембових хвиль високого порядку. У разі пружного шару з жорсткого матеріалу при $a_0 < c_R$ ідеальна рідина перешкоджає енергетичному обміну між поверхнями. Це призводить до того, що в пружному шарі не формуються нормальні хвилі високого порядку і в гідропружній системі поширюється лише одна нижча квазіповерхнева хвиля, яка при зростанні частоти трансформується в хвилю Стоунлі.

У роботі встановлено, що однією з основних особливостей впливу в'язкої рідини на хвильовий процес у пружному шарі, що взаємодіє з рідким півпростором, є те, що вона (на відміну від ідеальної рідини) сприяє енергетичному обміну між поверхнями пружного шару (взаємодії об'ємної та зсувної хвиль). Це зумовлює формування в пружному шарі нормальних хвиль високого порядку і виникнення в гідропружній системі повного спектру узагальнених мод Лемба, що поширюються з демпфуванням.

Отримані результати дають підставу зробити висновок про те, що при проведенні розрахунків реальних рідких середовищ застосування моделі ідеальної рідини до гідропружного хвилеводу з пружним шаром з жорсткого матеріалу (метали, сплави) може призвести до отримання неточних не тільки кількісних, але і якісних результатів.

1. Гузь А.Н. Введение в динамику сжимаемой вязкой жидкости. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 244 с.

2. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в 2-х частях. Часть 1. Общие вопросы. Волны в бесконечных телах и поверхностные волны. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 501 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЇ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ТА СТРУКТУРИ

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 загальний підхід до оптимізації за швидкодії режимів термообробки елементів конструкцій складної форми та структури.

Розглянуто термочутливе структурно-неоднорідне тіло, яке займає область Ω евклідового простору R^3 з неперервною за Ліпшицем поверхнею Γ (фізико-механічні характеристики тіла залежать від просторових координат і температури). Тіло віднесено до криволінійної системи координат $Ox^1x^2x^3$. На частині Γ_u поверхні Γ тіла задано переміщення $\vec{u} = \vec{u}_0$, а на частині Γ_σ – силове навантаження, яке характеризує вектор \vec{p} ; $\vec{r} = [x^1, x^2, x^3]$ – радіус-вектор точки тіла в криволінійній системі координат $Ox^1x^2x^3$; $\Gamma_u \cup \Gamma_\sigma = \Gamma$. Тіло перебуває за умов термообробки (нагрівання-охолодження).

Температурне поле й напружено-деформований стан тіла у процесі термообробки

визначають такі параметри стану: $t(\vec{r}, \tau)$ – температура; $\mathcal{E}(\vec{r}, \tau)$ – тензор напружень; $\mathcal{E}(\vec{r}, \tau)$ – тензор деформацій; $\vec{u}(\vec{r}, \tau)$ – вектор переміщень. Параметри стану пов'язані між собою, з фізичними і геометричними параметрами тіла та зовнішніми діями, заданими вектором силового навантаження \vec{p} та функцією теплового навантаження $h(\tau)$ (функція керування), системою рівнянь

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

Система рівнянь (1) при заданих теплових навантаженнях $h(\tau)$, зовнішній силі \vec{p} і параметрах тіла є замкненою.

За функціонал оптимізації J вибрано тривалість процесу термообробки τ^* , тобто

$$J = \tau^*(h). \quad (2)$$

За критерій оптимальності вибрано мінімальне значення функціоналу (2), тобто

$$I = \min_h \tau^*. \quad (3)$$

Вимоги до якості виробів і параметрів технологічних процесів термообробки задані обмеженнями

$$\varphi_j(\vec{r}, \tau, t, \mathcal{E}, \mathcal{E}, \vec{p}, \vec{u}, h) = 0, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4)$$

У розглядуваному формулюванні задача оптимізації теплових режимів у процесах термообробки полягає в знаходженні функції керування $h(\tau)$, яка забезпечує мінімум тривалості процесу нагрівання-охолодження (3) при в'язях (1) і обмеженнях (4).

При розв'язуванні системи рівнянь термомеханіки використано метод зважених залишків в поєднанні з методом скінченних елементів [1].

Алгоритм розв'язування екстремальної задачі будується на основі принципу поетапної параметричної оптимізації [2].

1. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *Finite Element Method: Vol 1. The Basis.* – London: "Butterwoth Heinemann", 2000. – 689 p.
2. Химмельбау Д. *Прикладное нелинейное программирование.* М.: Мир, 1975. - 532с.

СИСТЕМА ЕЛЕКТРИЧНО ІЗОЛЬОВАНИХ ТРІЩИН НА МЕЖІ ПОДІЛУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

М.О. Ульянов, Т.В. Ходанен

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто плоску деформацію в площині (x_1, x_3) біматеріального п'єзоелектричного простору з колінеарними електрично ізольованими тріщинами вздовж межі поділу матеріалів. Відстані між тріщинами, їх розташування і кількість n можуть бути довільними. Позначимо через $L = \bigcup_{k=1}^n (a_k, b_k)$ множину областей тріщин, а через $L = (-\infty, \infty) \setminus L$. Вважається, що на нескінченності задані нормальне і дотичне напруження $\sigma_{33}^{(m)} = \sigma$, $\sigma_{13}^{(m)} = \tau$ а також електричне зміщення $D_3^{(m)} = d$. Введемо вектори:

$$\mathbf{V} = [u_1, u_3, \varphi]^T, \quad \mathbf{t} = [\sigma_{13}, \sigma_{33}, D_3]^T.$$

Тоді умови на межі поділу матеріалів запишуться у вигляді:

$$\text{для } x_1 = L : \langle \mathbf{V}(x_1) \rangle = 0, \langle \mathbf{t}(x_1) \rangle = 0, \quad (1)$$

$$\text{для } x_1 = L : \sigma_{13}^{(m)}(x_1, 0) = 0, \sigma_{33}^{(m)}(x_1, 0) = 0, D_3(x_1, 0) = D, \quad (2)$$

де D – електричне зміщення, задане на берегах тріщин.

Для розв'язання задачі невідомі електромеханічні фактори представляються через функції, аналітичні у всій площині, включаючи зв'язані частини межі поділу матеріалів. На основі цих представлень сформульовано задачу лінійного спряження, яку розв'язано точно. Знайдено замкнуті вирази для напружень і електричних зміщень поза тріщинами, а також для стрибків переміщень і електричного потенціалу по ділянках тріщин.

Швидкість звільнення енергії у довільній вершині тріщини b_k ($k = 1, 2, \dots, n$) згідно з [1] представляється у вигляді:

$$G_{b_k} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta l} \int_{b_k}^{b_k + \Delta l} \sigma_{33}^{(1)}(x_1, 0) \langle u_3(x_1 - \Delta l) \rangle + \sigma_{13}^{(1)}(x_1, 0) \langle u_1(x_1 - \Delta l) \rangle + D_3^{(1)}(x_1, 0) \langle \varphi(x_1 - \Delta l) \rangle dx_1 \quad (3)$$

На основі знайдених напружень, електричних зміщень, стрибків переміщень і електричного потенціалу отримано аналітичні вирази для швидкостей звільнення енергії у вершинах тріщин. Чисельний аналіз виконується для різних навантажень, діелектричної проникності тріщин, їх кількості, довжини та розташування. Показано, що зменшення відстані між тріщинами призводить до інтенсивного зростання швидкості звільнення енергії для сусідніх вершин тріщини і до більш помірної зміни переміщень та стрибків електричного потенціалу берегів тріщини.

- [1]. V. Z. Parton, B. A. Kudryavtsev, Electromagnetoelasticity, New York, Gordon and Breach, 1988.

ПРО УДАРНІ ХВИЛІ У ВОДЯНОМУ КУЛЕУЛОВЛЮВАЧІ

Р.В. Коба¹, В.А. Максимюк¹, В.С. Ушакова¹, О.В. Ушаков²

¹Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України,

²Інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Для визначення раціональних з погляду запасу міцності параметрів циліндричного гідрокулеуловлювача було виконано експерименти в Центрі колективного користування приладами «Аналізатор динамічних процесів» з використанням 8-канального реєстратора LMS SCADAS Mobile (Бельгія).

На основі попередньої верхньої оцінки було виготовлено спрощений експериментальний макет вертикального кулеуловлювача. Для вимірювання деформацій на зовнішню поверхню сталеві труби висотою 2 м, діаметром 0,2 м і товщиною стінок 5 мм було наклеєно вздовж висоти ряд тензорезисторів. Маса труби з водою становила понад 100 кг. Відстрілювались кулі масою 7,45 г з початковою швидкістю 360 м/с.

На рис. 1 показана осцилограма колових деформацій одного з каналів (C2) від тензорезистора, наклеєного на висоті 0,55 м від дна циліндра. Вертикальні подвійні курсори відмічають проміжки часу між моментами осцилограми.

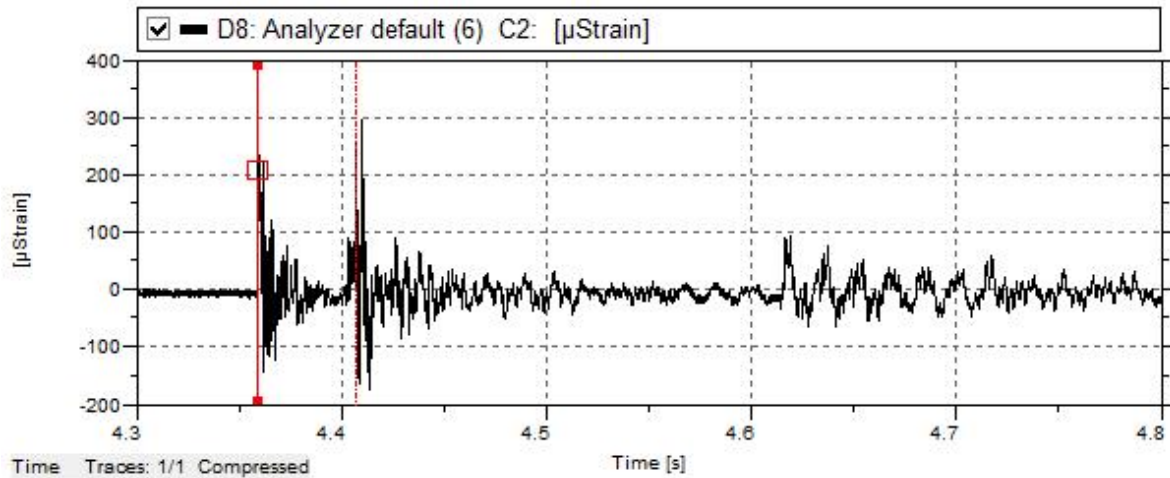


Рисунок 1 – Колові деформації на зовнішній поверхні циліндра

На цій та інших осцилограмах спостерігались по три локальні сплески максимальних деформацій (час t відрховується від початку запису приладом), що свідчить про поширення ударної хвилі в трубі. Перші сплески ($t_1 \approx 4,35$ с) відповідають моментам проходження фронту первинної ударної хвилі. Другі сплески ($t_2 \approx 4,4$ с) відповідають так званій вторинній ударній хвилі і виникають через порівняно короткий проміжок часу $\Delta t_{12} = 0,047$ с, що було встановлено за допомогою вертикальних курсорів. В подібному експерименті [1] на підставі оптичних спостережень автори пояснили появу вторинної ударної хвилі явищем суперкавітації.

Треті сплески ($t_3 \approx 4,6$ с) мають просте пояснення. Річ у тім, що кулеуловлювач, отримавши імпульс від кулі, ніби «підскакує» від підлоги (візуально на кілька сантиметрів). Після цього він вдаряється об підлогу, що викликає нову ударну хвилю, яка поширюється вгору.

1. Shi, H.H., Itoh, M., & Takami, T. (2000). Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry. *J. Fluids Eng.*, 122(4), 806-810.

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ ЗІ ЗМІННИМИ ВЗДОВЖ МЕРИДІАНА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРІАЛУ

Є.Д. Рябченко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

В сучасному машинобудуванні, зокрема в галузі авіаційної та ракетно-космічної техніки, активно використовуються оболонки обертання, до яких висуваються високі вимоги до конструктивної ефективності, міцності та вагової досконалості. З розвитком технологій вже сьогодні дозволяє виготовляти конструктивні оболонки зі змінною

жорсткістю і неоднорідною структурою, що є більш ефективними з погляду матеріаломісткості, міцності, надійності та інших характеристик.

В представленій роботі запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану оболонок обертання зі змінними фізико-механічними властивостями матеріалу. Задача зводиться до побудови числового алгоритму розв'язання крайових для систем звичайних диференціальних рівнянь, отриманих відносно основних параметрів напружено деформованого стану, які були подані у роботі [1]

$$\frac{\partial \bar{Y}}{\partial s} = \bar{A} \bar{Y} + \bar{B}$$

де у якості компонент вектора \bar{Y} приймається

$$y_1 = \xi, y_2 = \vartheta, y_3 = Nr, y_4 = M_1 r, y_5 = \zeta;$$

де ξ — радіальне переміщення, ϑ — кут нахилу нормалі твірної, Nr — добуток розпірної сили на радіус паралельного кола, $M_1 r$ — добуток моменту вигину на радіус паралельного кола, ζ — осьове переміщення. В таблиці 1 система рівнянь приведена в матричному вигляді.

Таблиця 1 — Табличне зображення системи диференціальних рівнянь

	$y_1 = \xi$	$y_2 = \vartheta$	$y_3 = Nr$	$y_4 = M_1 r$	$F(s)$	q_r
$\frac{dy_1}{ds} =$	$-\mu \frac{\cos \vartheta}{r}$	$-\sin \vartheta$	$\frac{1-\mu^2}{Eh} \frac{\cos^2 \vartheta}{r}$	0	$\frac{1-\mu^2}{Eh} \frac{\sin \vartheta \cos \vartheta}{2\pi r}$	0
$\frac{dy_2}{ds} =$	0	$-\mu \frac{\cos \vartheta}{r}$	0	$\frac{12(1-\mu^2)}{Eh^3 r}$	0	0
$\frac{dy_3}{ds} =$	$\frac{Eh}{r}$	0	$\mu \frac{\cos \vartheta}{r}$	0	$\mu \frac{\sin \vartheta}{2\pi r}$	$-r$
$\frac{dy_4}{ds} =$	0	$\frac{Eh^3}{12} \frac{\cos^2 \vartheta}{r}$	$\sin \vartheta$	$\mu \frac{\cos \vartheta}{r}$	$-\frac{\cos \vartheta}{r}$	0
$\frac{dy_5}{ds} =$	$-\mu \frac{\sin \vartheta}{r}$	$\cos \vartheta$	$\frac{1-\mu^2}{Eh} \frac{\sin \vartheta \cos \vartheta}{r}$	0	$\frac{1-\mu^2}{Eh} \frac{\sin^2 \vartheta}{2\pi r}$	0

Система рівнянь інтегрується з урахуванням граничних умов, відповідних виду закріплення контуру, як, наприклад, для затиснутого (а), шарнирно опертого (б) та вільного (в) приймає вигляд

а) $\xi = 0; \vartheta = 0; \zeta = 0;$

б) $\xi = 0; M_1 = 0; \zeta = 0;$

в) $N = 0; M_1 = 0;$

Алгоритм направлений на дослідження НДС оболонок обертання із функціонально градієнтних матеріалів, зокрема композитних та металокерамічних сплавів з різною частиною керамічної фази. До керамічної фази відносять оксиди (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO , SiO_2 , ZrO_2), карбіди (SiC , Cr_3C_2 , TiC), бориди (Cr_2B_2 , TiB_2 , ZrB_2), силіциди ($MoSi$), нітриди (TiN) і вуглець (алмаз, графіт)[2]. Контролюючи вміст керамічної фази можна або підвищити термостійкість матеріалу або його міцність.

Відмінністю цієї від звичайної задачі розрахунку оболонки обертання полягає тому, що модуль пружності (E) та число Пуассона (μ), які входять у рівняння, є функціями від координат вздовж меридіана $E = E(s), \mu = \mu(s)$.

Для прикладу практичного застосування, було розглянуто зміну E на термозахисному покритті аерокосмічних апарата X-51A WAVERIDER (рис. 1). В основі (ширша частина оболонки): висока механічна міцність для витримування механічних навантажень, яка має більшу частку металевої матриці (наприклад, сплави на основі титану Ti-6Al-4V або нікелю Inconel). Перехідна зона, середня частина твірної: градієнтне зростання частки керамічної фази (наприклад, SiC або ZrO₂), для оптимізації термостійкості без різкого зменшення міцності. На вершині (носова частина): переважання керамічних матеріалів (SiC, HfB₂, ZrB₂), для забезпечення високої термостійкості для захисту від аеродинамічного нагріву.

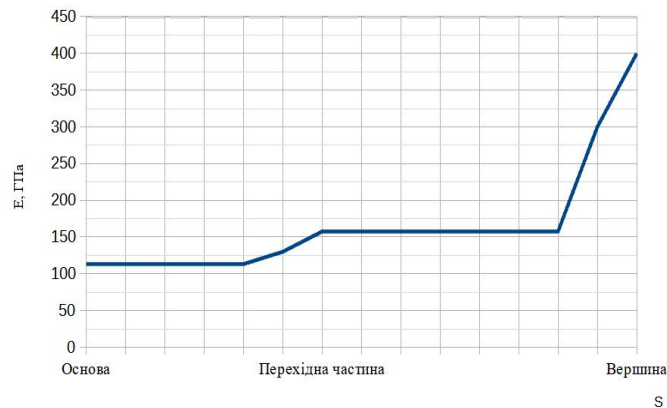


Рис. 1 – Графік функції E в залежності від довжини твірної.

У загальному випадку розв'язок сформульованої крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь з заданими граничними умовами приймаючи до уваги змінність коефіцієнтів вдається отримати тільки числовими методами.

З цією метою використовується метод прогонки з ортогоналізацією по Годунову, суть якого полягає в поділі всього інтервалу інтегрування на окремі ділянки, де чисельне інтегрування вихідного диференціального рівняння виконується аналогічно методу початкових параметрів. Довжини цих ділянок обираються так, щоб у межах кожної з них розв'язки однорідного рівняння залишалися лінійно незалежними. При переході між ділянками матриця рішень зазнає лінійного перетворення, що забезпечує ортогональність векторів часткових розв'язків однорідного та неоднорідного рівнянь. Це дозволяє зберегти лінійну незалежність розв'язків на всьому інтервалі інтегрування.

Література

1. Бидерман В.Л., Механика тонкостенных конструкций, М.:, Машиностроение, 1977. – 488 с.
2. Паржницький О.В., Аушева С. В., Шулепіна Г. Ю. Електроматеріалознавство, Видавництво «Грамота», м. Київ, 2023. - 226 с.
3. United States Air Force. X-51A WAVERIDER Factsheet. Official Website of the U.S. Air Force. [Online] 05 03, 2013. [Cited: 07 26, 2013.] <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104467/x-51a-waverider/>

ГЕОМЕТРИЧНО НЕЛІНІЙНИЙ ЗГИН ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПЛАСТИН СКЛАДНОЇ ФОРМИ

С.М. Склепус

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

snsklepus@ukr.net

Розроблено новий чисельно-аналітичний метод розв'язання геометрично нелінійних задач згину пластин складної форми з функціонально-градієнтних матеріалів. Постановку задачі виконано у рамках уточненої теорії вищого порядку, що враховує квадратичний закон розподілу поперечних дотичних напружень по товщині. Для лінеаризації 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 пластини (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 всім (загальна структура) або частині (часткова структура) граничних умов. Розв'язано тестові задачі для однорідної жорстко закріпленої та функціонально-градієнтних шарнірно опертих квадратних пластин, що знаходяться під дією рівномірно розподіленого навантаження різної інтенсивності. Результати для прогинів та напружень, отримані за допомогою розробленого методу, порівнюються із розв'язками, отриманими методом радіальних базисних функцій. Розв'язано задачу згину функціонально-градієнтної пластини складної форми. Досліджено вплив градієнтних властивостей матеріалу та геометричної форми на напружено-деформований стан.

АЛГОРИТМ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО СТАНУ ТОНКИХ ОБОЛОНОК ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

М.О. Бабешко, В.Г. Савченко

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАНУ

Пропонується алгоритм визначення осесиметричного пружнопластичного напружено-деформованого стану оболонкових елементів конструкцій з функціонально-градієнтних матеріалів, в процесах силового навантаження. Оболонку розглядаємо в криволінійній ортогональній системі координат, пов'язаній з координатною поверхнею, меридіан якої складається з кількох плавно з'єднаних ланок. Вважаємо, що матеріал

оболонки ізотропний, а його фізико-механічні властивості неперервно змінюються вздовж товщини у відповідності до заданого закону об'ємного вмісту матеріалів, з яких виготовлено функціонально-градієнтний матеріал. Деформування оболонки відбувається в межах та за межами пружності; в зонах пластичних деформацій можливе пружне розвантаження. Задача розв'язується в геометрично лінійній квазістатичній постановці в межах гіпотез Кірхгофа – Лява. Як визначальні рівняння використовуємо рівняння теорії процесів деформування вздовж траєкторій малої кривизни, лінеаризовані методом додаткових напружень. Згідно з цим методом визначальні рівняння, розв'язані відносно компонент тензора напружень, записуються у вигляді закону Гука з додатковими напруженнями, що містять пластичні складові компонент деформації, які вважаємо відомими з попереднього наближення. Записуючи визначальні рівняння в зусиллях і моментах, враховуємо залежність характеристик матеріалу від координати вздовж нормалі до координатної поверхні. Скориставшись рівняннями рівноваги, співвідношеннями Коші та визначальними рівняннями в зусиллях і моментах, одержуємо розв'язувальну систему шести звичайних диференціальних рівнянь. Компоненти матриці системи визначаються через параметри геометрії оболонки і пружні характеристики матеріалу, а компоненти вільних членів – ще і через пластичні складові компонент деформації. Процес навантаження розділяємо на етапи. На кожному етапі розв'язок шукаємо в процесі послідовних наближень [1]. При обчисленні елементів розширеної матриці системи пружні характеристики функціонально-градієнтного матеріалу визначаємо, як прийнято в [2, 3], за формулою $C(\zeta) = C_1 V_1(\zeta) + C_2 V_2(\zeta)$ (ζ - координата по товщині), де V_1 і V_2 - об'ємні вмісти матеріалів 1 і 2, пов'язані співвідношенням $V_1 + V_2 = 1$. Для обчислення пластичних складових деформацій по заданих діаграмах деформування матеріалів 1 і 2 за відомим [1] алгоритмом обчислюємо прирости інтенсивностей накопичених пластичних деформацій і визначаємо приріст для даної точки за тією ж формулою, що й пружні характеристики. Далі одержуємо прирости пластичних складових і самі ці складові і обчислюємо вільні члени системи. При обчисленні інтегралів по товщині використовуємо метод Сімпсона. Для розв'язання крайової задачі користуємось методом дискретної ортогоналізації.

1. Babeshko M.O., Savchenko V. G. *Convergence Improvement Technique in the Method of Successive Approximations in Boundary-Value Problems of Thermoviscoplasticity // Int. Appl. Mech.* – 2023. – 59, N 4. – P. 429 – 441.

2. Reddi J.N. *Analysis of functionally graded plates // Int. J. Numerical Methods in Engng.* - 2000. - 47. - P. 663 - 684.

3. Sklepus S.M. *Method of Solving Geometrically Nonlinear Bending Problems of Functionally Graded Shallow Shells of Complex Shape // Int. Appl. Mech.* – 2023. – 59, N 6. – P. 725– 733.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОМПОНОВОК БЕЗПІЛОТНИХ НАДВОДНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

А.В. Сохацький, А.Ю. Дреус

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Інститут транспортних систем та технологій НАН України
Університет митної справи та фінансів*

Розв'язання російської федерації війни проти України вимушує науковий та інженерно-технічний персонал наукових установ України проводити пошук способів захисту проти агресора. Постійні обстріли російськими агресорами з акваторії Чорного моря мирної території України спричиняє величезні руйнування та загибель мирного населення. Для унеможливлення запуску ракет агресором з морської акваторії Україні необхідні безпілотні надводні літальні апарати. Такі літальні апарати повинні мати відповідні системи наведення і рухатись над близько розміщеною водною поверхнею з швидкістю не менше 250 км/год.

Для оцінки ефективності таких транспортних засобів слід скористатися залежністю енергоефективності від швидкості Габрієла-Кармана. Такий аналіз ґрунтується на безрозмірному фізичному параметрі, який називають питомою потужністю ϵ . Питома потужність визначається як відношення вихідної потужності силової установки до добутку загальної маси транспортного засобу на максимальну швидкість. Проведений аналіз транспортних засобів типу: судна на повітряній подушці, водні транспортні засоби, судна на підводних крилах, екраноплани показує певну перевагу надводних літальних апаратів типу екраноплан. Такі судна в західній термінології ще називають Wing-in-ground-crafts (WIG craft). Ще початку минулого століття авіаційні фахівці звернули увагу на екранний ефект, який діє на літальний апарат при наближенні до землі. Слід відмітити, що потенційна сфера використання екранопланів є може бути доволі широкою – від транспортних апаратів військового призначення до широкого використання в цивільній та промисловій галузях.

Використання екранного ефекту дозволяє WIG – апаратам мати площу крила набагато меншу ніж у літака за умови рівної їх маси. Окрім цього ходові якості екранопланів значно перевищують ходові якості інших транспортних засобів. Проте комерційна привабливість WIG – апаратів є предметом окремого обговорення. За оцінками Агенства передових наукових проєктів США (ARPA) відзначаються великі капітальні витрати на проєкти WIG–апаратів порівняно з традиційними морськими суднами. Окремим питанням є створення WIG – апаратів з оптимальними аеродинамічними характеристиками з урахуванням заданих режимів руху.

Діючий екранний ефект приводить до перерозподілу аеродинамічних навантажень на несучі поверхні WIG – апарату. Як показали експериментальні дослідження екранопланів для стабілізації поздовжнього руху потрібно мати горизонтальне оперення, що має розмір не менше 40% площі основного крила, Близькість водної поверхні вводить обмеження на розмах крила та відповідно кути крену. Війна розв'язана московією проти України довела переваги використання безпілотних систем в умовах сучасного бою та спеціальних операцій. Необхідність створення безпілотних надводних літальних апаратів для захисту країни є важливим завданням для наукових та інженерно-технічних фахівців. В доповіді розглядаються питання особливості формування аеродинамічних компоновок таких безпілотних надводних літальних апаратів. Також звертається увага на інші аспекти, що можуть

принести перевагу при виконанні військово-морських операцій спеціальними підрозділами Збройних сил України.

COMPUTER SIMULATION OF ELASTIC DEFORMATION OF BIMATERIAL PLATES WITH TRIANGULAR HOLES DEPENDING ON THE COMBINATION OF MATERIALS

E. L. Hart, A. A. Syaseva

Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine

In the design of modern engineering structures that are subject to various loads, due to the requirements for optimizing strength and weight in such industries as aerospace, construction and military industries, piecewise homogeneous, in particular bimaterial plates with holes, are widely used. Introducing holes in such plates to improve performance characteristics leads to the emergence of a significantly non-uniform state of the structure. This, in turn, affects the distribution of stresses, which can cause their local concentration and increase the likelihood of failure of the structure. For a detailed study of the stress-strain state (SSS) of such complex systems, numerical methods are often used, in particular, the finite element method (FEM), which is a universal tool for modeling and analyzing the behavior of complex structures, including those with heterogeneities. The use of this method allows for optimizing, in particular, the designs of armored vehicles and aircraft, increasing their mobility, level of protection and efficiency in extreme operating conditions. In addition, with the help of FEM, it is advisable to predict the behavior of structures under load, which contributes to the development of effective engineering solutions to minimize the risk of their destruction.

One of the ways to reduce the stress concentration factor (SCF) around holes can be the use of piecewise homogeneous materials. As shown by previous studies, the presence of a central insert made of another material in a plate with round and elliptical holes [1] and in a cylindrical shell with round holes leads to a significant decrease in the SCF value (by $\sim 20\%$ – $\sim 25\%$). Such a mechanical effect occurs if the rigidity properties of the central insert material are ~ 3 times lower than those of the main plate/shell material. In this paper, the SCF of bimaterial plates with one and two triangular holes is investigated. Particular attention is paid to the influence of the geometric parameters (width) and mechanical properties of the central insert made of another material, as well as the distance between the holes on the stress concentration around them. FEM was used to solve this problem. The aim of the work is to determine the SCF for various configurations of bimaterial plates with triangular holes, as well as a comparative analysis of the obtained numerical results with known solutions for individual cases [1 – 3].

The calculations were performed for bimaterial plates of dimensions $l_1 \times l_2$ with one and two triangular holes located in the center of the plates and a central insert of width h made of another material. The insert has a thickness equal to the thickness of the plate, its width was varied. The plates were under uniaxial uniform tension $p = \text{const}$. It was assumed that the hole is modeled as an equilateral triangle inscribed in a circle of radius r_0 , while the procedure of rounding its corners was used. The conditions of ideal mechanical contact are specified at the boundary between the central insert and the matrix (plate). The modeling is performed under the assumption that there is a certain transition layer at the boundary of the plate and the insert, within which averaging of the mechanical properties of the materials occurs. The following insert widths are considered: 1) $h = 2r_0$ (h is the width of the insert made of a material with

the modulus of elasticity E_2 and Poisson's ratio ν_2); 2) $h > 2r_0$ ($h=3r_0; 4r_0$); 3) $h < 2r_0$ ($h=1.5r_0; r_0; 0.5r_0$). The distance l between the holes varied.

For the sake of certainty, a combination of two materials was considered in the computer simulation of the deformation process of bimaterial plates: aluminum ($E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.36$) and alloy steel ($E=210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$). It was assumed that the plate material is steel, and the material of the central rectangular insert is aluminum. The radius of the circle described around the triangular hole $r_0 = 0.02 \text{ m}$; the width of the insert h varied: $h \geq 2r_0=0.04 \text{ m}$; 0.06 m ; 0.08 m ; $h < 2r_0=0.03 \text{ m}$; 0.02 m ; 0.01 m ; tensile loading $p = 10 \text{ MPa}$. The choice of materials is conditional.

For each variant, a comparative analysis of the SCF with the data for a homogeneous plate was carried out and a rational configuration was determined in terms of reducing the SCF value. The analysis of the obtained results shows that the triangular hole is a significant stress concentrator, and the SCF value in a bimaterial plate depends significantly on both the geometric and mechanical parameters of the central insert [2]. Based on the results of a series of computational experiments, it was found that in order to reduce the stress concentration around one or two triangular holes in the plate, it is advisable to use a central insert made of another material, the rigid properties of which are lower than those of the main material of the plate. Of the considered variants, the best result was shown by an insert with a width of $0.5r_0$ (r_0 is the radius of the circle described around the triangle), the elastic modulus of the material of which is three times less than that of the plate, which made it possible to reduce the stress concentration by $\sim 46\%$ compared to a homogeneous plate.

The obtained results are in good agreement with the results of similar problems for piecewise homogeneous plates and cylindrical shells with round and elliptical holes [1]. Here, the mechanical effect of the insert width on the change in the value of the SCF is also observed: with a decrease in the width of the "soft" insert, the SCF decreases. Consequently, as a result of the conducted computer modeling and numerical analysis, it can be concluded that in order to reduce the value of the SCF in a plate with triangular holes, it is advisable to use "soft" central inserts made of another material when designing. The obtained data on the stress distribution allow choosing rational parameters of piecewise homogeneous plates, the placement of inserts and holes to reduce the stress concentration in order to improve the operational characteristics of structures. It is promising to find rational parameters for piecewise homogeneous plates with other configurations of holes, their number and location.

References

1. **Hart E. L., Potseluko Ye. A.** Computer simulation of behavior of piecewise homogeneous plates with two circular and elliptical holes // Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures: Col. of sci. art. Dnipro: Lira, 2022. Vol. 34. P. 23–35. <https://doi.org/10.15421/4222103>
2. **Hart E. L., Syaseva A. A.** Stress concentration in bimaterial plates with a triangular hole // Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures: Col. of sci. art. Dnipro: Lira, 2024. Vol. 38. P. 20–35. <https://doi.org/10.15421/42241032>
3. **Savin G. N.** Stress distribution around holes. Kiev: Naukova dumka, 1968. 888 p.

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО ЗБУДЖЕННЯ НА РУХ ЦИЛІНДРА З РІДИНОЮ З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ, ЩО ЗНАХОДИТЬСЯ НА РУХОМІЙ ПЛАТФОРМІ.

Р. В. Ткаченко ¹, Н.Є. Ткаченко ²

¹ Державний університет «Київський авіаційний інститут»

² Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

В транспортних засобах широко використовуються резервуари, які знаходяться на рухомій платформі. Розглянемо рух абсолютно твердого циліндра, частково заповненого однорідною, ідеальною, нестисливою рідиною, приєднаного пружиною до рухомої рами. В початковий момент часу система знаходиться в спокої, відсутні вихрові рухи, впливом поверхневого натягу на коливання рідини нехтуємо. Математична модель руху такої системи побудовано в роботі [1]. Аналіз здійснюється на основі синтезу варіаційного формулювання задачі і розділення механічних рухів. Застосовується варіаційний принцип Гамільтона-Остроградського і кінематичні граничні умови. Переходячи до дискретної моделі отримуємо систему звичайних диференціальних рівнянь. Позначимо: τ – область, яку займає рідина в даний момент часу, $z = \xi(x, y, t)$ – рівняння вільної поверхні в збуреному стані, яке невідоме, ε_x – рух циліндра відносно початкового положення під дією прикладеної до рами імпульсної сили, u_x – рух циліндра відносно платформи, V_x – швидкість руху резервуара. Для чисельних розрахунків приймалася модель, яка включає 12 форм коливань [1]. Проведено розрахунки у вказаній моделі та в моделі без пружини, де маса резервуара збільшена на масу, відповідну масі рами попередньої моделі. Співвідношення мас рідини резервуару рами в безрозмірному вигляді відповідно $M_l = 3141.59$ кг, $M_{res} = 0,25 M_l$, $M_{fr} = 5 M_l$. Використовували такі жорсткості пружини: $c = 50$ кН/м, 100 кН/м, 200 кН/м, 500 кН/м, 2000 кН/м., а також жорстке закріплення. До рами прикладається сила у вигляді прямокутного імпульсу з різними амплітудами і тривалістю $0.01c$, $0.02c$, $0.05c$, $0.1c$, $0.2c$, $0.5c$, $1c$. Амплітуди імпульсів підбирались так, щоб коливання вільної поверхні рідини попадали в зону максимальних значень нелінійних коливань. Чим більше тривалість імпульсу тим при меншій амплітуді імпульсу вони досягаються. Час обчислення взято $t = 125$ с. В розрахунках використовувались відношення всіх величин до радіусу циліндра. Тут обмежимося аналізом руху циліндра, при цьому зменшимо шаг розрахунку в 10 раз. Рух циліндра відносно початкового положення при різних значеннях жорсткості пружини і різних значеннях тривалості імпульсу відбувається з малою пульсацією навколо прямої лінії. При відсутності пружини графік руху циліндра відносно платформи буде мати вигляд усталеного гармонічного коливання з малою амплітудою. При наявності пружин буде відбуватись коливання з модуляцією з дрейфом середнього значення. Амплітуда коливань збільшується з збільшенням жорсткості пружини до $c = 500$ кН/м а потім зменшується практично при всіх значеннях тривалості імпульсу. Найбільш суттєва модуляція відбувається при тривалості імпульсу $0.2c$. і $c = 500$ кН/м. При всіх значеннях жорсткості маємо вплив вищих гармонік.

1. Limarchenko O., Tkachenko R. Effect of spring fixation on dynamics of cylindrical reservoir with liquid on movable platform // International Applied Mechanics – 2014.–50.– №3.– P. 69–76

ПРО ОДНУ ДИНАМІЧНУ ЗАДАЧУ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПОЛОСИ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

Ю. П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Розглядається попередньо напружена стислива полоса товщиною h на жорсткій основі. Граничні поверхні полоси є плоскі і паралельні між собою. Початковий напружено-деформований стан полоси вважається однорідним.

Вважаємо можливими два варіанта контакту між полосою і жорсткою основою: жорсткий контакт і нежорсткий контакт.

Зосереджена сила рухається по вільній поверхні полоси з постійною швидкістю v . Припускаємо, що напруження, що виникають за рахунок дії навантаження, значно менші початкових напружень. Це припущення дозволяє застосувати лінеаризовану теорію пружності для опису додаткового напруженого стану, викликаного дією навантаження.

Розв'язок задачі отримано за допомогою інтегрального перетворення Фур'є.

Чисельні дослідження проведені в рамках теорії скінченних початкових деформацій для матеріалу з пружним потенціалом гармонічного типу. Вважалось, що початковий деформований стан плоский і поверхневе навантаження відсутнє.

На рис. 1 показані епюри узагальненого напруження в шарі \tilde{Q}_{22} при $y_2 = -h/2$, $v^2 = 0,1c_0^2$, початкових напруженнях $\lambda_1 = 0,8$, $\lambda_1 = 0,9$, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_1 = 1,1$ і $\lambda_1 = 1,2$ і різних умовах контакту між шаром і основою. Зліва – нежорсткий контакт, справа – повний (жорсткий) контакт. Тут $c_0^2 = m/c$; c_0 – швидкість поперечних хвиль у полосі без початкових напружень.

З рис.1 слідує, що вплив початкових напружень є незначним особливо для нежорсткого контакту.

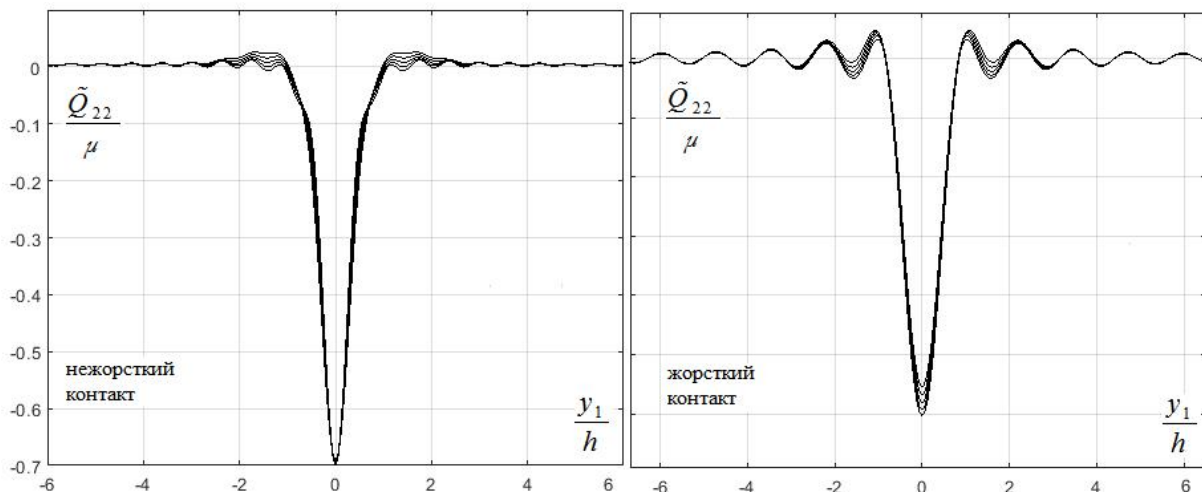


Рис. 1. Узагальнені напруження в полосі \tilde{Q}_{22} при $y_2 = -\frac{h}{2}$

Існує зона найбільшого впливу початкових напружень на відстані однієї товщини шару від точки прикладення навантаження. При нежорсткому контакті значення напружень більші, ніж при жорсткому контакті, а хвиля затухає швидше.

ПРО СТІЙКІСТЬ ТРЬОХШАРОВОГО ТІЛА З МІЖФАЗНИМ ДЕФЕКТОМ

І. Ю. Гергель

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Поява дефекту (тріщини, розшарування) на границі поділу матеріалів у шаруватому композитному матеріалі внаслідок технологічного процесу може призвести до руйнування конструкції шляхом розкриття цих дефектів, якщо елементи конструкції з шаруватих матеріалів знаходяться під дією стискаючого навантаження вздовж границь поділу.

Розглядається плоска задача втрати стійкості пружного трьохшарового тіла, що складається із трьох ізотропних шарів. Тіло має дефект на границі поділу матеріалів між двома шарами та затиснено між двома абсолютно жорсткими гладкими плитами, отже, трьохшарове тіло знаходиться під дією зовнішнього стискаючого навантаження, паралельного вільним поверхням, яке призводить до однорідної деформації. Раптове розкриття міжфазної тріщини відбувається при критичному значенні стискаючого навантаження та вважається втратою стійкості трьохшарового тіла з міжфазним дефектом.

Задача втрати стійкості розглядається в точній постановці в рамках тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл. Розв'язок системи рівнянь стійкості отримано за допомогою нескінченних інтегральних перетворень Фур'є.

Аналітичними перетвореннями проблема втрати стійкості зводиться до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь другого роду з ядрами типу Коші відносно похідних від стрибка переміщень берегів тріщини з додатковими умовами.

Отримана задача знаходження нетривіального розв'язку системи сингулярних інтегральних рівнянь з додатковими умовами за допомогою квадратурної формули зводиться до системи $2n$ однорідних алгебраїчних рівнянь відносно $2n$ значень невідомих функцій.

Критичне навантаження, за якого міжфазна тріщина раптово розкривається, знаходиться з умови рівності нулю визначника отриманої системи однорідних алгебраїчних рівнянь.

Досліджується вплив товщини шарів і фізичних параметрів матеріалів шарів тіла на значення критичного навантаження.

INFLUENCE OF LOADING HISTORY ON THE INITIAL ANGLE OF CRACK PROPAGATION

K. V. Panin

Oles Honchar Dnipro National University

At present, when solving elastic-plastic problems for bodies with cracks, the simplest theories of plasticity such as the theory of small elastic-plastic deformations or flow theory are usually used. It is obvious that the applicability of the solutions obtained in this case is limited due to the limited capabilities of the theories used in describing complex loading processes.

The problem of determining the stress-strain state of a rectangular elastic-plastic plate with an edge crack under complex combined loading is considered. An algorithm for solving this boundary value problem is proposed, when differential-nonlinear relations of the plasticity theory taking into account micro strains are used as equations of state (Novozhilov V.V., Kadashevich Yu.I., Chernyakov Yu.A.). 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 nonuniform 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. The presented approach has been based upon an assumption that statistics of anisotropic crystals can be replaced by statistics of isotropic particles having various yield limits and random field of micro stresses and micro strains.

Mathematically, the boundary value problem within the framework of this variant of the theory of plasticity is formulated as a nonlinear boundary value problem in spatial coordinates and Cauchy problem in the loading parameter. Numerical algorithm for solving this boundary value problem of is based on a variational formulation. A nonlinear variational problem is reduced to a sequence of linear problems by a method similar to the method of variable elastic parameters. Then, the standard procedure of the finite element method is applied, which made it possible to reduce the solution of the boundary value problem to the solution of a system of first-order differential equations with respect to the velocities of nodal displacements. The latter are obtained using the Euler method with intermediate iterations. At each step of the Euler method, the region of active microplastic deformation directions is determined by the simple iteration method. Efficient algorithms are proposed for calculating the stiffness matrices of finite elements, which made it possible to reduce the number of multiple integrals to be calculated in the constitutive relations of the plasticity theory taking into account microstrains to the dimension of the loading trajectory.

The described algorithm is implemented as a program in the C++ language. With its help, calculations of the stress-strain state of a rectangular plate with an edge crack are performed for various variants of complex combined loading. The influence of the loading history on the initial angle of crack propagation is studied. The following criterion of local destruction is adopted: the crack begins to propagate in the direction of the maximum energy flow to the crack tip when the magnitude of this flow reaches a critical value (Mossakovskiy V.Y., Rybka M.T.). A comparison of the obtained results with calculations using the simplest theories of plasticity is also carried out.

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИСПЕРСІЙНИХ РІВНЯНЬ ДЛЯ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ В СТИСЛИВОМУ КОМПОЗИТНОМУ МАТЕРІАЛІ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ ПРОКОВЗУВАННІ ШАРІВ

А. Ю. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Шаруваті композитні матеріали - найважливіший клас композитів, що мають широкий спектр і унікальне поєднання таких цінних властивостей, як висока міцність, корозійна стійкість, електро- і теплопровідність, жароміцність, зносостійкість та ін. Сьогодні ці матеріали знаходять все більше застосування в суднобудуванні, автотракторобудуванні, приладобудуванні, металургійному, гірничодобувному, нафтовому, сільськогосподарському та ін. галузях машинобудування.

Переважна частина досліджень стосовно поширення хвиль у шаруватих композитних матеріалах з початковими напруженнями проводилися для повного контакту шарів. В реальності отримати композитний матеріал з ідеальним контактом на границях розділу шарів достатньо важко, оскільки при його виготовленні можуть виникати різного роду порушення адгезії. Оскільки в механіці доцільно давати нижню та верхню оцінки параметрам явищ, то важливим також буде розглянути другий крайній випадок контакту між шарами – повне проковзування.

В роботі [1] було проведено дослідження поширення хвиль кручення в шаруватому стисливому композитному матеріалі при повному контакті шарів. В даній роботі розглядається аналогічна задача для випадку повного проковзування шарів.

Дослідження виконані в рамках 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.

Початковий напружений стан вважається однорідним.

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 поширення хвиль кручення в радіальному напрямку вздовж шарів композиту. Для симетричних і антисиметричних хвиль кручення отримано дисперсійні рівняння та їх довгохвильові наближення. Дисперсійні рівняння розв'язані аналітично.

Встановлено, що між шарами композитного матеріалу у випадку проковзування не відбувається взаємодії.

Проаналізована залежність швидкостей розповсюдження симетричних і антисиметричних хвиль кручення від початкових напружень в шарах композитного матеріалу при проковзуванні шарів

Література

1. Гузь А. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в 2-х частях. Ч. 2. Волны в частично ограниченных телах. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КОНТАКТУ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ДВОШАРОВОГО ТІЛА З ВРАХУВАННЯМ ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ

Є.О. Коваленко, С.О. Чернецький

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається задача визначення напружено-деформованого стану (НДС) двошарового пружно-пластичного пакету кінцевих розмірів під дією абсолютно жорсткого штампу прямокутної форми. Штмп зчеплений з верхнім шаром тіла. Враховуються наступні види контакту між шарами: зчеплення, проковзування без врахування тертя і проковзування з врахуванням тертя за законом Кулона. Навантаження розглядається для двох траєкторій (рис.1): при заданих значеннях вектора переміщень $\vec{\Delta}(\Delta_x, \Delta_y)$ штампу (Δ_x – горизонтальний зсув, Δ_y – вертикальна осадка штампу).

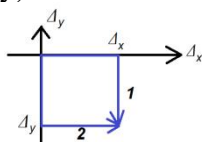


Рис.1. Траєкторії навантаження

Врахування історії навантаження проводиться у межах теорії плинності з лінійним трансляційним зміцненням [1]. Визначальні співвідношення теорії течії записуються, у швидкостях або приростах. За допомогою методу варіаційних нерівностей в роботах [2, 3] 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.

Отримані результати для осадки штампу $\Delta Y = -0.0015 \text{ м}$ та горизонтального його зсуву на $\Delta X = 0.001 \text{ м}$.

Обрані матеріали шарів тіла:

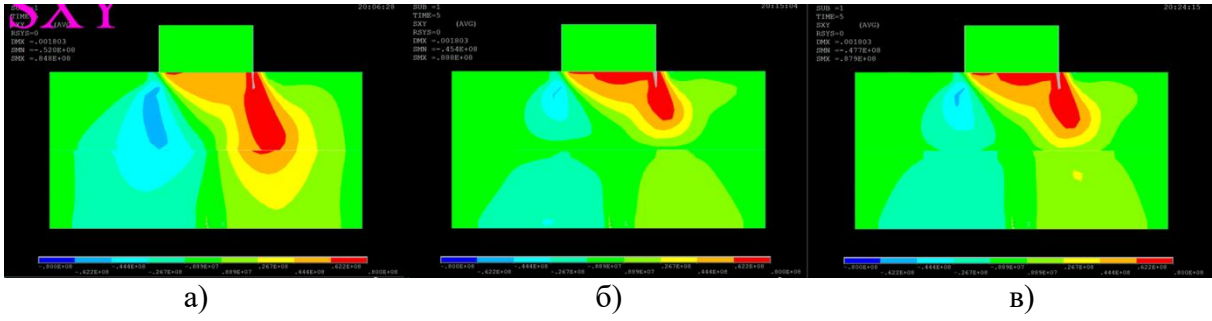
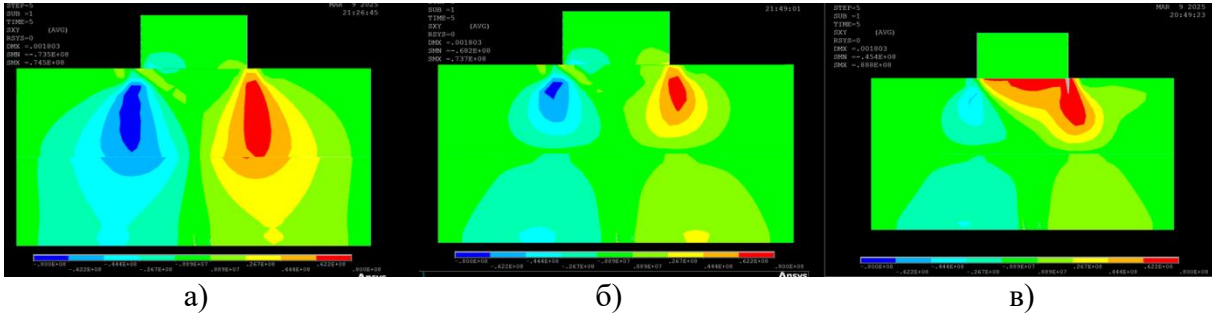
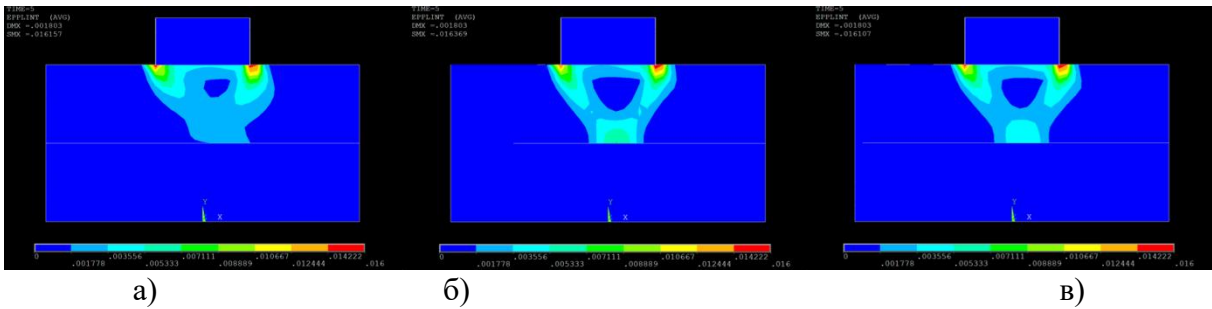
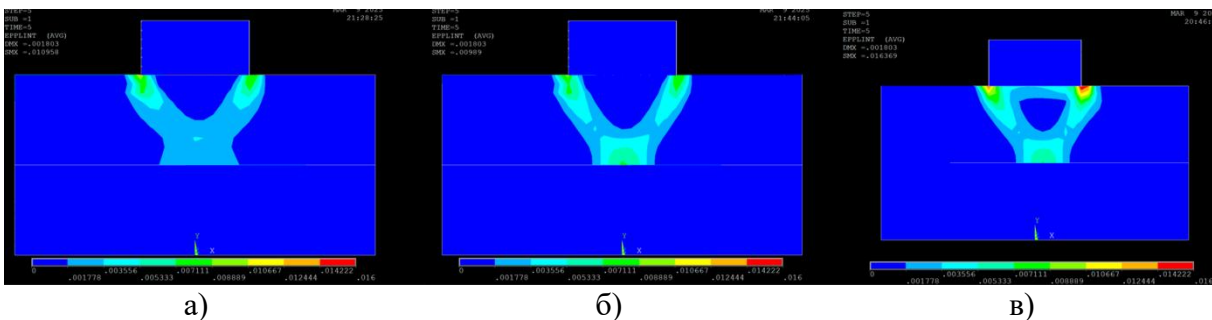
верхнього мідно-нікелевий сплав: $E_1 = 1.53 \times 10^5 \text{ МПа}$; $\nu_1 = 0.3$;
 $\nu_1 = 0.3$; $\sigma_{s1} = 124 \text{ МПа}$; тангенційний модуль $E_{t1} = 5 \times 10^3 \text{ МПа}$.

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. 2-5 наведено розподіл дотичних напружень σ_{xy} інтенсивності пластичних деформацій $\varepsilon_i^{(p)}$ для двох траєкторій навантаження (рис.1) у випадках а) – зчеплення; б) – проковзування без тертя; в) – проковзування з тертям.

Порівнюючи результати розрахунків, отримані для різних умов контакту між шарами, відмічаємо значне збільшення пластичних деформацій при другій траєкторії навантаження (на 50%) при урахуванні сил тертя (рис.5). Врахування сил тертя значною мірою не впливає на розподіл дотичних напружень (рис.2), але зменшує вертикальні додатні переміщення торців верхнього шару відносно випадку проковзування без тертя.

Рис. 2. Дотичні напруження σ_{xy} (траєкторія 1)Рис. 3. Дотичні напруження σ_{xy} (траєкторія 2)Рис.4. Інтенсивність пластичних деформацій $\epsilon_i^{(p)}$ (траєкторія 1)Рис.5. Інтенсивність пластичних деформацій $\epsilon_i^{(p)}$ (траєкторія 2)

Врахування ж тертя при розрахунках по першій траєкторії призводить до звуження зони пластичності, але максимальні деформації змінюються незначним чином відносно варіантів зчеплення і проковзування без тертя (2% і <1% відповідно). Варто зазначити різницю між розподілами дотичних напружень σ_{xy} між варіантами а) і б) при першій і другій траєкторії навантаження. Також помітне значне зменшення інтенсивності пластичних деформацій при розрахунку по другій траєкторії у варіантах а) і б). Врахування тертя нівелює відмінності.

Список літератури

1. Можаровський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості / К.: Вища школа, 2002.- 312 с.
2. 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.
3. Чернецкий С.А. Вариационная постановка термоупругопластических задач для слоистых тел при наличии трения //Вопросы прочности и пластичности. Днепропетровск: ДГУ, 1989. - С.43-49

СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРОНИКНИХ ТРІЩИН НА МЕЖІ РОЗДІЛУ ДВОХ ОДНОВИМІРНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КВАЗІКРИСТАЛІВ

О.В. Комаров

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається скінченна кількість колінеарних тріщин уздовж межі розділу двох одновимірних п'єзоелектричних гексагональних квазікристалів. Тріщини можуть мати довільну довжину та відстань між своїми вершинами і вважаються електропроникними. Фононне та фазонне навантаження, що призводить до стану плоскої деформації, прикладене на нескінченності, тріщини вважаються відкритими.

Використовуючи представлення фононних і фазонних характеристик через кусково-аналітичні функції, задачу зведено до системи задач лінійного спряження, розв'язок яких отримано в аналітичній формі. Фононні та фазонні напруження на лінії тріщин, а також відповідні скачки переміщень на берегах тріщин представлені у замкнених аналітичних формах.

З використанням отриманих аналітичних результатів представлено чисельно отримані ілюстрації стрибків зміщення фононних і фазонних поверхонь тріщин, напружень уздовж межі розділу, а також швидкість виділення енергії для різних матеріалів. З цих результатів випливає, що розкриття фононної тріщини та напруження дуже незначно залежать від зовнішнього фазонного навантаження, тоді як подібні фазонні компоненти істотно залежать від цього навантаження. Зменшення відстаней між тріщинами призводить до суттєвого збільшення відповідних швидкостей енерговиділення, але зростання швидкості виділення енергії для сусідніх вершин тріщин значно інтенсивніше, ніж для віддалених. Вплив конвергенції тріщин є набагато більшим для локальних характеристик тріщин, таких як швидкість виділення енергії, ніж для загальних характеристик, таких як відкриття фононних і фазонних тріщин.

З'ясовано, що всі поля мають осцилюючу сингулярність у вершинах тріщин, тому швидкість виділення енергії є найбільш відповідним параметром руйнування в цьому випадку. Використовуючи асимптотичні представлення фононних і фазонних полів у вершинах тріщин та інтегральний підхід закриття тріщин, отримано аналітичну формулу для швидкості виділення енергії. Зміна стрибків переміщення поверхонь фононної та фазонної тріщин, напружень вздовж лінії поділу та швидкість виділення енергії представлені у вигляді графіка та таблиці для різних вершин тріщин, навантажень, довжин тріщин та їх розташування. Зроблено нові цінні висновки щодо

впливу взаємодії тріщин, їх кількості та розташування на швидкість виділення енергії, фононні та фазонні поля.

1. Fan TY, Mai YW. Elasticity theory, fracture mechanics and some relevant thermal properties of quasicrystal materials // Appl Mech Rev 2004; 57(5): 325–344. <https://doi.org/10.1115/1.1763591>.

2. Rao KRM, Rao PH, Chaitanya BSK. Piezoelectricity in quasicrystals. Pramana-Journal of Physics 2007; 68: 481–487, <https://doi.org/10.1007/s12043-007-0051-3>.

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ 3D-ПРИНТУ ПЛОСКИХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

І.К. Сенченков¹, О.П.Червінко¹, О.В.Доля²

¹Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ

e-mail: term@inmech.kyiv.ua

²Київський національний університет будівництва і архітектури,

e-mail: elena_367@ukr.net

Аддитивні технології, зокрема 3D-принт, є найбільш перспективним напрямком сучасного промислового виробництва, який належить шостому технологічному укладу. Сутність процесу виготовлення деталі полягає у послідовному, зазвичай пошаровому, нанесенні матеріалу.

Робота присвячена математичному і чисельному моделюванню напружено-деформованого і теплового поточного і залишкового стану плоских і циліндричних елементів при шаровому нарощуванні рідким металом.

Математична модель процесу базується на теорії нарощуваних тіл, моделі в'язкопластичної течії Боднера-Партома і використанні концепції «власного» температурно-деформаційного стану для задоволення неklasичних умов на поверхні нарощування. Нелінійна гранична задача розв'язується методами покрокового за часом інтегрування та методом ітерацій. Лінеаризована задача термомеханіки, яка виникає на кожній ітерації, розв'язується методом скінченних елементів.

Розглянуто процеси нарощування прямокутної пластини шарами полімеру PLA, а також порожнистого циліндра рідкими шарами сталі 35ХМА. Досліджено розподіли поточних і залишкових напружень і дисторсії елементів. Вивчено залежність параметрів стану від товщини шарів і швидкості їх нанесення. На рис. 1 наведено схему нарощення (а), залишковий НДС (б) та дисторсію (в) порожнистого циліндра зі сталі 35ХМА.

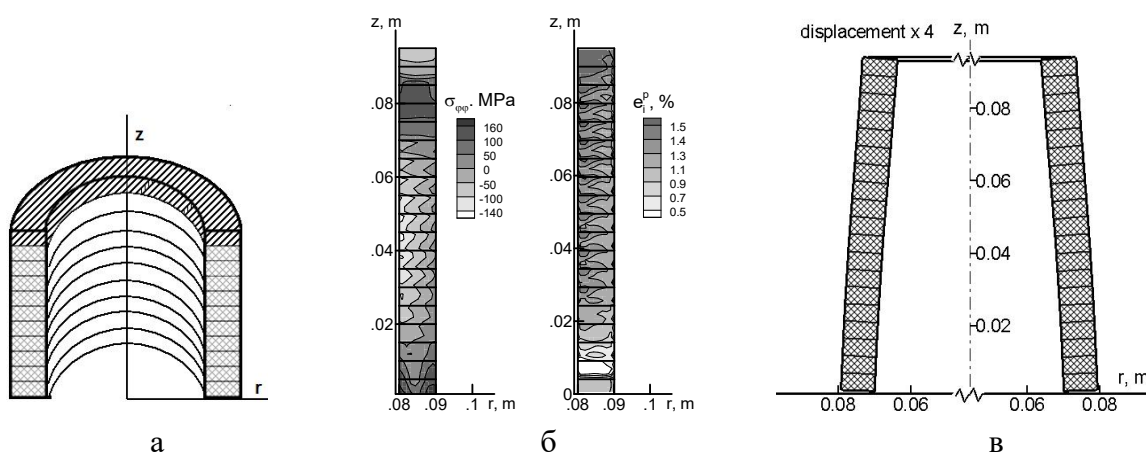


Рис.1

Залишковий НДС нарощених тіл має двомасштабну квазіперіодичну структуру товщина нарощуваного шару – висота циліндра (довжина пластини).

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА НА ОСНОВІ ГЕОМЕХАНІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ВАРІАЦІЇ ВПЛИВОВИХ ПАРАМЕТРІВ

К.В. Бабій, Г.І. Ларіонов, О.В. Говоруха, А.І. Рябко

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

У роботі використовувались результати моніторингу технічного стану дамби діючого хвостосховища «Криві Луки» ПАТ «Орджонікідзевський ГЗК» із метою виявлення причин деформаційних процесів та зон потенційної нестійкості. Був проведений комплекс інженерно-геологічних та гідрогеологічних досліджень, що дозволили ідентифікувати глибинні зони зниження міцності, зокрема області накопичення пілувато-піщаних ґрунтів пластичної консистенції.

Моніторинг виконувався у декілька етапів, що дозволило прослідкувати динаміку процесів. За результатами первинного буріння свердловин було виявлено ділянки дамби хвостосховища з деформаційними процесами, а саме зони однорідних насипних глин, зона ламінарної фільтрації техногенного походження, зона неоднорідної будови дамби. Через чотири роки на цих ділянках було виконано буріння нових контрольних свердловин. Після обробки кернів визначилось значне збільшення розмірів лінзи супіщаних порід пластичної консистенції, яка впливає на розвиток деформаційних процесів в дамбі. Для встановлення причин розвитку геомеханічно нестабільної зони були досліджені гірничо-геологічні, гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови використання споруди. Встановлено, що проблемна ділянка дамби розташована вздовж балки, земельна ділянка під спорудою історично була затопленою багато років, геологічна будова масиву, що є основою хвостосховища, не була підготовлена для будівництва гідротехнічної споруди. Запропоновано для збільшення ефективності подальшого моніторингу закласти ґрунтові репери на ділянках дамби саме в зоні збільшення потужності шару супіщаних порід пластичної консистенції.

Завдяки комплексу натурних спостережень (візуальних та інструментальних) було виявлено ділянки дамби хвостосховища неоднорідної структури, зону ламінарної фільтрації та лінзу порід пластичної консистенції. Обґрунтовано, що ці зони потребують уваги, бо пов'язані з попереднім виявленням скритих процесів, які в перспективі призводять до появи таких негативних явищ як просідання, тріщини, обвали тощо, зокрема через порушення режимів фільтрації, водовідводу та гідроізоляції.

Аналіз геомеханічної стійкості хвостосховища дозволяє точно оцінювати здатність витримувати навантаження та своєчасно виявляти потенційні загрози. Завдяки цьому можна проводити превентивні заходи, запобігати аваріям та забезпечувати безпеку споруд і прилеглих територій. Такий аналіз допомагає підтримувати високу надійність гідротехнічних об'єктів протягом тривалого часу їх експлуатації.

Отримані результати є підґрунтям для формування нових математичних задач геотехнічної механіки, зокрема в таких напрямках:

- Статика та динаміка деформованих середовищ, що описують поведінку неоднорідного ґрунтового масиву під впливом змінного фільтраційного навантаження.
- Механіка зв'язаних полів: постановка задач, що поєднують впливи механічного напруження, порового тиску та водонасичення на стійкість ґрунту.
- Механіка руйнування та втома: моделювання накопичення пластичних деформацій у зонах знижених характеристик міцності.
- Коливання і стійкість руху: дослідження власних коливань дамбового масиву з урахуванням періодичних коливань рівня води в сховищі.
- Математичне моделювання: постановка задач на основі рівнянь теорії пружності та пластичності з урахуванням реологічних властивостей ґрунтів і чисельна реалізація моделей за допомогою скінченно-елементного методу.

Окрему увагу приділено проблемам фільтраційної нестійкості (суфозії), яка потребує побудови моделей, що враховують зміни гідравлічного градієнта в часі та просторі.

У межах дослідження технічного стану дамби діючого хвостосховища «Криві Луки» ПАТ «Орджонікідзевський ГЗК» розглянуто задачу математичного моделювання її стійкості як одну з ключових у сучасній геотехнічній механіці. Актуальність обумовлена складністю будови ґрунтової основи, наявністю зон із деформаційними процесами, а також необхідністю врахування комплексу фізико-механічних параметрів, що визначають стабільність гідротехнічних споруд.

На поточному етапі дослідження було побудовано інженерно-геологічний розріз дамби хвостосховища (рис.1), на основі якого сформовано початкову геометричну модель для розрахунків. Виконано розрахунок стійкості споруди, результатом якого є коефіцієнт стійкості та побудований графік граничної розрахункової збіжності коефіцієнта стійкості (рис.2), що свідчить про граничний стан дамби при даних вхідних параметрах.

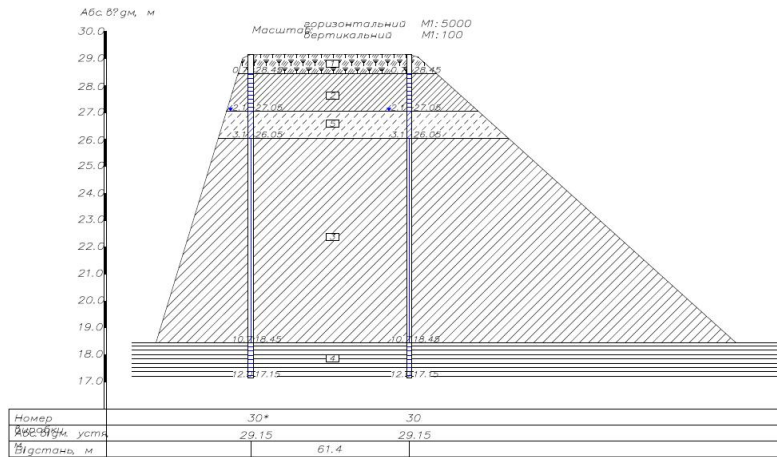


Рисунок 1. Інженерно-геологічний розріз дамби

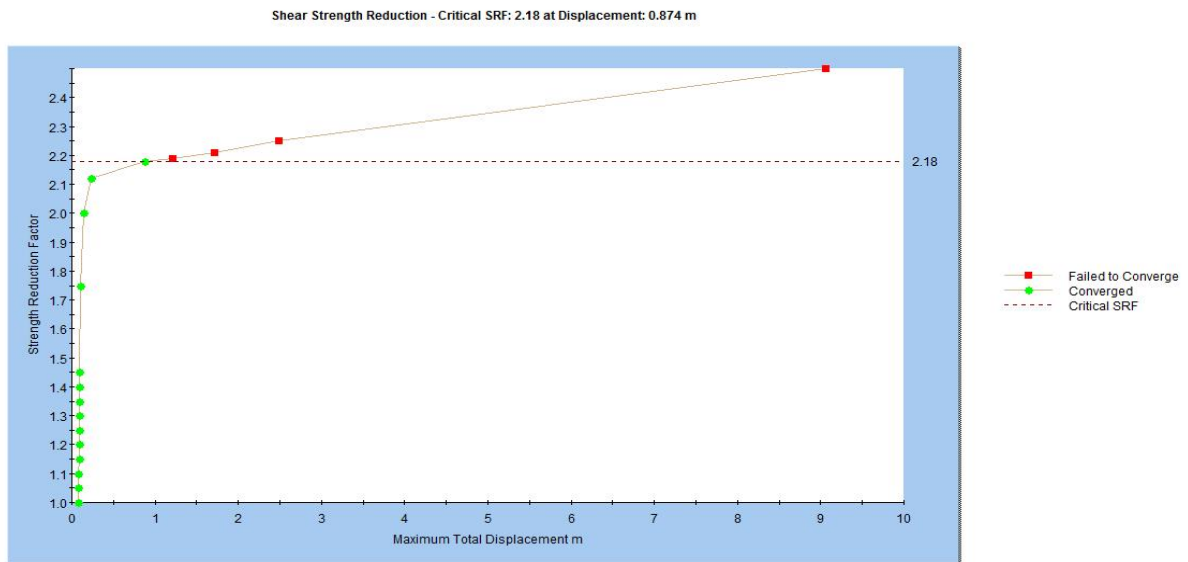


Рисунок 2. Графік граничної розрахункової збіжності коефіцієнта стійкості

Окрім того, за допомогою чисельного аналізу отримано розподіл максимальних зсувних деформацій по контуру масиву, що дозволяє ідентифікувати потенційно небезпечні зони (рис.3).

Results

Method	Factor of Safety
SSR (Phase2)	1.39
Spencer (Slide)	1.398

Greco (1996) Spencer Factor of Safety = 1.40 - 1.42
 Spencer (1969) Spencer Factor of Safety = 1.40 - 1.42

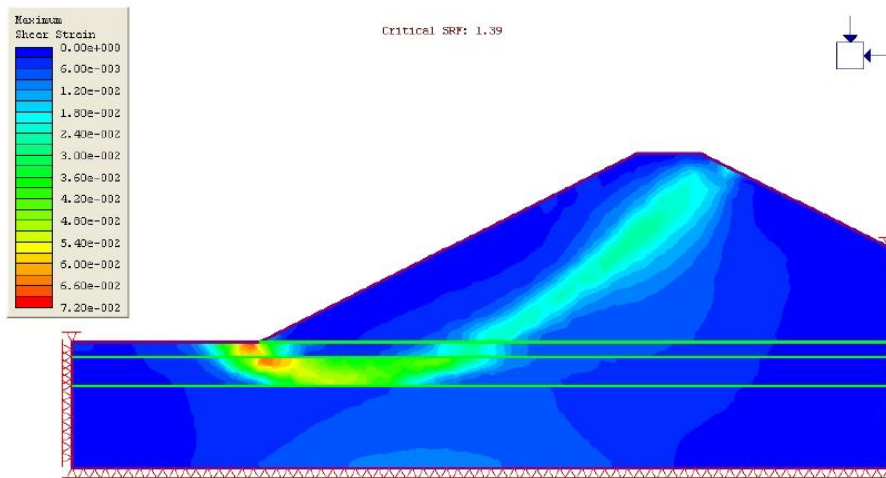


Figure 2 Solution Using SSR

Рисунок 3. Розподіл максимальних зсувних деформацій

Також побудовано графік значень нормальних напружень у контурі дамби, що дає уявлення про внутрішній напружений стан споруди (рис.4).

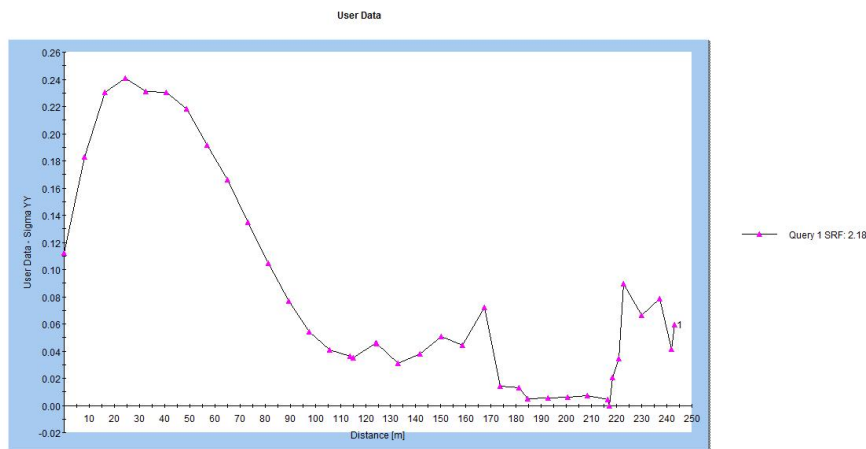


Рисунок 4. Графік значень нормальних напружень у контурі дамби

Основною математичною задачею на подальшому етапі роботи є побудова узагальненої математичної моделі стійкості дамби, яка враховуватиме діапазон зміни ключових параметрів, що мають істотний вплив на результат.

У рамках задач механіки деформованого твердого тіла розглядається постановка моделі в умовах нелінійної пружності з елементами пластичної поведінки, а також аналіз стійкості з урахуванням фільтраційного навантаження. Окрема увага приділяється уточненню крайових умов, які відображають вплив підтоплення, дренажу, гідростатичного тиску тощо.

Метою подальших досліджень є виведення нової аналітичної формули або емпіричної залежності для оцінки стійкості дамби, яка дозволить здійснювати попередній аналіз критичних станів за змінних умов. Така формула матиме прикладне

значення при проектуванні та реконструкції гідротехнічних споруд у складних інженерно-геологічних умовах.

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ДОВГОЇ ТОНКОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ СУПЕРКОЛОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Ю.Ю. Абрсов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Вступ. Циліндричні тонкі оболонки неколового поперечного перерізу мають широке застосування у техніці, будівництві і інших галузях народного господарства. Особливу увагу привертають до себе оболонки т.н. “суперколового” поперечного перерізу.

Суперколо в декартових координатах описується рівнянням:

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

При $n = 2$ воно вироджується в звичайне коло. При парних n рівняння суперкола суттєво спрощється і приймає такий вигляд:

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

При великих значеннях n суперколо більше наближається до квадрата з заокругленими кутами, що проілюстровано на рис. 1.

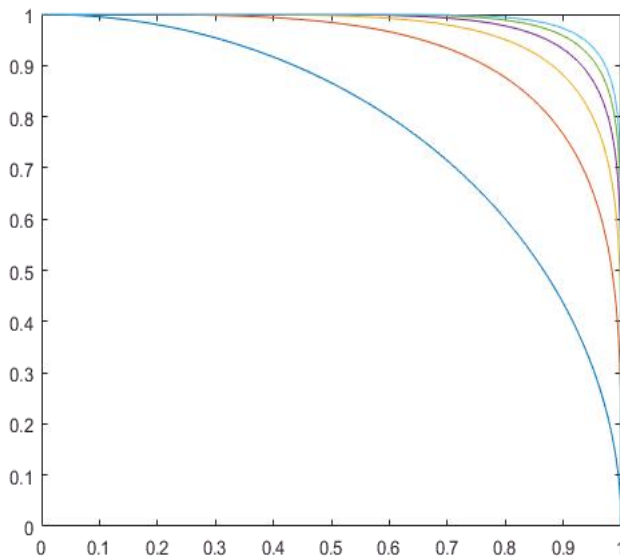


Рис. 1

Тут зображено одну чверть квадрата з вписаними в нього суперколами для різних (парних) значень n від 2 до 12.

З курсу геометрії відомо, що площа кола, вписаного в квадрат, на чверть менша за площу квадрата. Таким чином, суперколовий переріз оболонки при великих n має суттєво більшу площу, ніж коловий при тих самих габаритах. А це означає більшу ємність оболонкової конструкції (наприклад резервуару). Крім того розміщення таких оболонок в зовнішніх конструктивних елементах (ферменних конструкціях), які мають прямокутну (квадратну) форму в перерізі, і закріплення в них суттєво спрощується в порівнянні з оболонками колового перерізу.

З точки зору міцності суперколові оболонки поступаються коловим і напруження в них суттєво вищі при тих самих навантаженнях. Окрім того, в місцях максимальної

кривизни в них виникають концентрації напружень, що можуть призвести до втрати стійкості форми чи навіть до руйнування оболонки.

Таким чином вибір форми суперколового перерізу оболонки (оптимального значення n) має задовольняти як конструктивні, так і міцнісні вимоги,

Моделі і методи розрахунку. В рамках лінійної теорії оболонок [2,3,4], тонка оболонка моделюється її серединною поверхнею з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Лява. Віднесемо серединну поверхню 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, вісь z напрямлена вздовж твірної циліндра, а вісь γ - по нормалі до серединної поверхні (рис. 2).

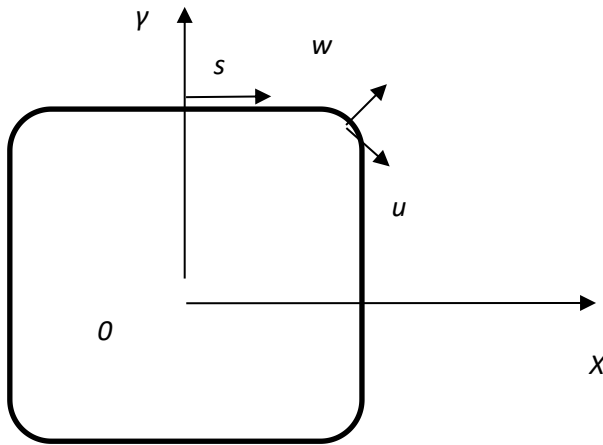


Рис. 2

Нехай під дією сталого і рівномірного внутрішнього тиску p в ізотропній однорідній пружній тонкій оболонці постійної товщини h виникають малі переміщення в поперечному перерізі (компоненти u і w), а вздовж вісі z переміщення відсутнє (компонента v дорівнює нулю). Тоді компоненти напружено-деформованого стану (НДС) залежатимуть тільки від координати s , що суттєво спрощує розрахунки.

Розрахунки проводились варіаційно-різницевим методом (ВРМ) і методом скінченних елементів (МСЕ). Внаслідок симетрії задачі відносно площин $x=0$ і $y=0$ розглядалась тільки чверть області суперкола, як показано на рис. 1.

Випадок $n=2$ (коло) розглядався як тестовий варіант, оскільки для нього існує аналітичний розв'язок [5] в рамках плоскої вісісиметричної задачі теорії пружності (задачі Ляме).

Випадок $n=4$ для ВРМ цілком відповідає розрахунку восьмої частини суперкола [1] і приводиться для порівняння з МСЕ.

Випадки для $n=6; 8; 10$ розглядалися тільки для МСЕ, оскільки при великих значеннях n коефіцієнти розрахункової матриці, що використовується в ВРМ, стають дуже малими, що суттєво затруднює розрахунок, практично унеможлиблює його.

Для випадку $n=12$ труднощі виникають уже в МСЕ. Вони обумовлені значним уповільненням збіжності ітераційного процесу, що використовується в методі. Виникає явище мембранного замикання [6]. Крім того збільшення n з 10 до 12 несуттєво змінює геометрію оболонки (останні дві криві на рис. 1, що їм відповідають, мало відрізняються одна від одної).

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. Для розрахунків приймалися варіанти дискретизації ВРМ (МСЕ) – моделей порядку 10-11 тис. точок

контура (елементів секції оболонки одиничної ширини) за виключення випадку $n = 2$, де така висока дискретизація не є необхідною для точності розрахунку.

В приведених нижче таблицях прийнято наступні позначення: \tilde{s} - відносна довжина дуги розглядуваної частини (чверті) суперкола; $\tilde{w} = w/h$ - відносний угин контуру поперечного перерізу серединної поверхні оболонки; ε_s^+ , ε_s^0 , ε_s^- - поздовжні деформації контура; σ_s^+ , σ_s^0 , σ_s^- - поздовжні напруження в контурі, віднесені до тиску p . Верхні індекси означають відповідні поверхні оболонки ("+" – верхня, "0" – серединна, "-" – нижня).

Таблиця 1а. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 2$, BPM)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,335	4,335	4,335	100,0	100,0	100,0
0,5	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,335	4,335	4,335	100,0	100,0	100,0
1	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,335	4,335	4,335	100,0	100,0	100,0

Таблиця 1б. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 2$, МСЕ)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,352	4,333	4,314	100,4	100,0	99,55
0,5	$4,4 \cdot 10^{-4}$	4,356	4,333	4,311	100,5	100,0	99,48
1	$4,3 \cdot 10^{-4}$	4,352	4,333	4,314	100,4	100,0	99,55

Таблиця 2а. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 4$, BPM)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	0,687	251,0	4,335	-242,3	5792	100,0	-5592
0,25	0,288	25,49	4,443	-16,60	592	102,5	-387
0,5	-0,173	-286,7	5,153	297,0	-6614	118,9	6852
0,75	0,288	25,49	4,443	-16,60	592	102,5	-387
1	0,687	251,0	4,335	-242,3	5792	100,0	-5592

Таблиця 2б. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 4$, МСЕ)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	0,687	251,1	4,338	-242,4	5795	100,1	-5595
0,25	0,288	24,97	4,415	-16,14	572	101,9	-368
0,5	-0,173	-285,6	6,139	297,9	-6594	139,4	6872
0,75	0,288	25,09	4,412	-16,27	575	101,8	-371
1	0,687	251,1	4,339	-242,4	5794	100,1	-5594

Таблиця 3. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 6$, МСЕ)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	1,133	324,8	4,332	- 316,1	7494	100,0	- 7295
0,25	0,558	56,99	4,341	- 48,31	1312	100,2	- 1112
0,5	- 0,142	- 435,4	7,954	451,3	- 10050	177,7	1040 7
0,75	0,554	54,06	4,341	- 45,38	1242	100,2	- 1042
1	1,133	324,7	4,332	- 316,1	7494	100,0	- 7294

Таблиця 4. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 8$, МСЕ)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	1,393	358,2	4,332	- 349,5	8266	100,0	- 8066
0,25	0,724	76,92	4,328	- 68,27	1774	99,9	- 1574
0,5	- 0,106	- 522,7	9,782	542,3	- 12074	216,0	1250 6
0,75	0,719	73,30	4,321	-64,65	1689	99,8	-1489
1	1,393	358,1	4,330	-349,5	8265	99,9	-8065

Таблиця 5. Переміщення, деформації та напруження в характерних точках суперкола ($n = 10$, МСЕ)

\tilde{s}	\tilde{w}	$\varepsilon_s^+ \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^0 \cdot 10^6$	$\varepsilon_s^- \cdot 10^6$	σ_s^+	σ_s^0	σ_s^-
0	1,557	376,8	4,331	- 368,2	8696	100,0	- 8496
0,25	0,832	86,92	4,317	-78,29	2010	99,7	-1811
0,5	-0,081	-578,4	12,55	603,5	-13354	282,8	13919
0,75	0,827	83,42	4,315	-74,79	1923	99,6	-1724
1	1,557	376,8	4,330	-368,1	8695	99,9	-8496

Висновки. Чисельні методи (ВРМ і МСЕ), що використовувались для розрахунку НДС оболонок суперколового поперечного перерізу дають результати, що добре узгоджуються з аналітичним методом для випадку $n = 2$ (коло). Для випадку $n = 4$ ці методи дають деяку розбіжність в результатах (більшу на зкривлених ділянках контуру і меншу – на пологих). Така розбіжність викликана урахуванням зсуву у МСЕ. При вищих значеннях n ВРМ уже не працює і слід розраховувати тільки на МСЕ. При $n > 10$ вже і МСЕ не працює, проте таке збільшення n практично не викликає зміни контура оболонки, а отже і на результат розрахунку не впливає. В будь-якому випадку при виборі форми контуру оболонки (а отже і значення n), виходячи з конструктивних особливостей її використання, слід враховувати наведені результати розрахунків для забезпечення її міцності і стійкості форми.

Література

1. *Абросов Юрій, Максимюк Володимир*. Про деформування довгої циліндричної оболонки суперколового поперечного перерізу // *Матеріали Всеукраїнської науково-методичної інтернет-конференції «Актуальні науково-методичні проблеми фізики та математики у закладах вищої освіти»*, присвяченої 90-річчю заснування кафедри фізики та кафедри вищої математики ім. проф. Можара В.І., 26 – 27 травня 2020 р., м. Київ, НУХТ. – К.: НУХТ, 2020. – С. 18–19.
2. *Новожилов В. В.* Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962.
3. *Гольденвейзер А. Л.* Теория упругих тонких оболочек. М.: ГИТТЛ, 1953.
4. *Лурье А. И.* Статика тонкостенных упругих оболочек. Гостехиздат, 1947.
5. *Timoshenko S.* Strength of materials. Part II, Advanced theory and problems. – 2nd Ed. – New York: D. Van Nostrand Company, 1941. – 510 p.
6. *Maksymyuk V.A.* Locking Phenomenon in Computational Methods of the Shell Theory // *Int. Appl. Mech.* – 2020. – 36, N 3. – P. 347 – 350.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ЕЛІПТИЧНОЇ ТРІЩИНИ
В ІЗОТРОПНОМУ ТІЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ
ANSYS SMART CRACK GROWTH**

Ходанен Т.В., Дерев'янюк В.В.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглянуто прямокутну ізотропну пластинку з еліптичною тріщиною, що виникла на осі симетрії перпендикулярно напрямку рівномірно розподіленого розтягувального навантаження, прикладеного до границь тіла (рис. 1). Для комп'ютерного моделювання використано студентську версію пакету ANSYS Mechanical R2024.

Із використанням SMART Crack Growth змодельовано процес росту тріщини. Для розрахунку використано тетраедричні елементи. За допомогою спеціальної функції створено високодеталізовану сітку в безпосередній близькості до вершин тріщини для забезпечення точності моделювання її поведінки. 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. На кожному кроці алгоритм SMART автоматично оновлює сітку з урахуванням зміни в геометрії тріщини, викликані її зростанням.

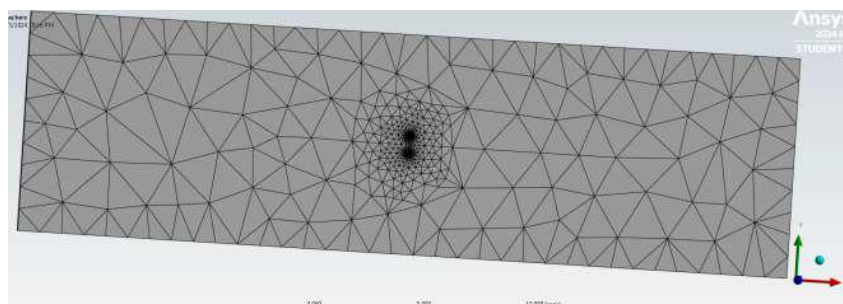


Рис. 1. Моделювання еліптичної тріщини

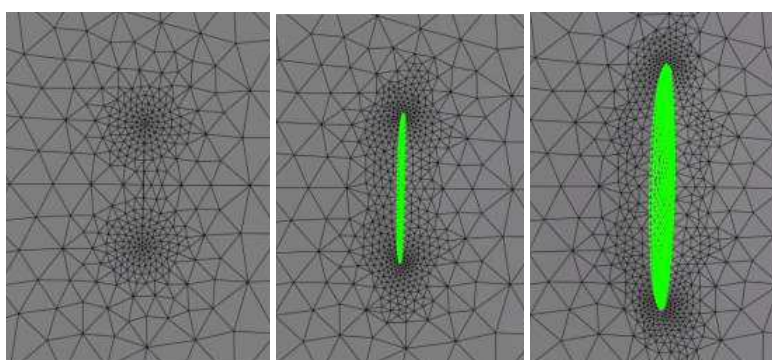


Рис. 3 Перебудова сітки та розкриття тріщини з використанням SMART Crack Growth

На кожному кроці розрахунку відомі: розподіл напружень і деформацій, коефіцієнти інтенсивності напружень, напрямок росту тріщини. Спостереження за процесом деформації (рис. 2) в режимі реального часу показав відсутність на початкових кроках розрахунків будь-якого росту тріщини, а з певного моменту, що залежить від конкретних заданих значень навантаження, характеристик матеріалу та геометричних параметрів тіла і тріщини, – збільшення довжини і розкриття тріщини, що свідчить про поступовість процесу руйнування.

ПРО НАБЛИЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ 2D ПОЛІВ В ОКОЛІ КУТОВИХ ТОЧОК ОБЛАСТІ ВИЗНАЧЕННЯ

А.О. Молчанов

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара

Багато задач механіки можна розглядати як двовимірні. Багато з них зводяться до розв'язування задачі типу Діріхле або Неймана в деякій області визначення, що не завжди має гладку границю (наприклад кути прямокутника). В околі точок, де порушується гладкість границі, чисельні методи розв'язання такої задачі, як правило, мають більшу похибку, іноді на порядки. Коли також наявні й похибки іншої природи (наприклад розривність граничних умов), зростанням похибки поблизу кутів часто можна знехтувати (якщо вона менша за похибку в околі точки розриву граничної

умови). Але коли застосовуються спеціальні методи підвищення точності поблизу точок з розривною граничною умовою (наприклад [1],[2]), похибка в кутових точках стає основним джерелом неточності. Способів зменшення такого типу похибок є декілька: декомпозиція області визначення, збільшення густоти сітки поблизу кутів в сіткових методах. В безсіткових методах (типу MFS) можна збільшити кількість точок сингулярності навколо кута або додати до множини апроксимуючих фундаментальних розв'язків певну лінійну комбінацію гармонійних функцій, що мають покращити апроксимацію у вершині кута (для кожного кута будується окрема лінійна комбінація).

Розглянемо спосіб відновлення потенціальних фізичних полів, який називається метод фундаментальних розв'язків (method of fundamental solutions, MFS). Основна ідея методу полягає в тому, що гармонічна функція, яка описує потенціальне поле, апроксимується комбінацією фундаментальних розв'язків рівняння Лапласа:

$$\tilde{u}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Phi_i(x), \quad (1)$$

де $\Phi_i(x) = \Phi(x - y_i)$, з точками сингулярності y_i , обраними навколо тої області, в якій потрібно відновити поле. Для 2D випадку $\Phi(x) = -\frac{1}{2\pi} \ln|x|$. Для визначення невідомих коефіцієнтів $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_m)$ у рівняння (1) підставляємо n відомих значень поля, що визначені (виміряні) в граничних вузлах $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Отриману систему n ($m+1$) лінійних рівнянь розв'язуємо в сенсі мінімізації суми квадратів відхилень. Така система є некоректною за Адамаром й для отримання адекватного розв'язку вимагає певного методу регуляризації.

У випадку задачі Діріхле маємо:

$$\begin{aligned} \Delta u &= 0, x \in \Omega \\ u &= g(x), x \in \Gamma' \end{aligned} \quad (2)$$

де Γ - границя області Ω . Якщо область має геометричні сингулярності (кути), то результат апроксимації поблизу них буде гірший, похибка може перевищувати середню похибку в решті області більш ніж на порядок. Для зменшення похибки можна доповнити множину точок сингулярності $\{y_i\}$ поблизу вершин кутів. Розташування таких додаткових точок може бути різне, але поблизу вершини кута щільність точок повинна бути вищою, ніж ближче до середин сторін многокутника.

Інший спосіб покращити точність апроксимації поблизу вершин кутів, полягає в доповненні лінійної комбінації (1) функціями спеціального виду:

$$f(x) = \sum_{n=0}^p r^{n\pi/\omega} \sin(n\pi\varphi/\omega), \quad (3)$$

або

$$f(x) = \sum_{n=0}^p r^{-n\pi/\omega} \sin(n\pi\varphi/\omega), \quad (4)$$

для кожної вершини кута, де r - полярний радіус довільної точки, якщо полюсом є вершина кута (тільки для випадку (3)), φ - полярний кут поточної точки, ω - величина кута, в околі якого здійснюється покращення апроксимації. Ці функції є гармонічними й повинні бути аналітичними в області Ω . Отже, у випадку (4) полюс повинен розміщуватись поза областю визначення Ω на невеликій відстані від вершини кута.

Виконано дослідження цих методів. Проведений аналіз чисельного моделювання показує, що регуляризація за методом Тихонова є більш стійкою у порівнянні з регуляризацією TSVD. Моделювання показало, що кожен з розглядуваних методів має свої недоліки й переваги, але ефективність їх приблизно однакова, точність залежить від вхідних параметрів. Оскільки програмна реалізація методу доповнення множини апроксимуючих функцій (1) функціями (3) або (4) значно складніша, ніж реалізація методу доповнення множини точок сингулярності $\{y_i\}$ поблизу вершин кутів, то перевагу можна віддати саме останньому.

1. Carlos J.S. Alves, Svilen S. Valtchev, Applied Mathematics and Computation 320(3):61-74 (2018).

2. Molchanov A.O. Problems of applied mathematics and mathematical modeling. Volume 24: 134-140 (2024).

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ ДЛЯ НАВАНТАЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ВИГЛЯДУ

Р.О. Щербак , А.Є. Шевельова

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Важливість вивчення проблеми тріщиностійкості конструкцій особливо зростає при застосуванні сучасних високоміцних матеріалів та можливого підвищеного рівня навантажень при створенні складних і дорогих об'єктів (реакторів, літальних апаратів, великих транспортних споруд та ін.)

Композиційні матеріали компонуються з різних складових, між якими можливо виникнення технологічних дефектів типу тріщин. Такі тріщини є дуже небезпечними з точки зору міцності і в більшості випадків являють собою основну причину руйнування конструкцій, виготовлених із композиційних матеріалів. Тому вивчення тріщин в областях поділу матеріалів (міжфазних тріщин) є важливим для практики.

Для деяких часткових видів навантаження в роботах [1, 2] було досліджено такі тріщини з урахуванням особливостей напружено-деформівного стану в привершинних зонах. Зокрема, в роботі [1] аналіз проведено для випадку симетричного навантаження, а в [2] враховано випадок, коли тріщина знаходиться у прошарку між двома матеріалами.

В даній роботі проведено аналіз зон передруйнування для тріщини між двома матеріалами у загальному випадку навантаження. Із застосуванням аналітичного підходу основну увагу приділено випадку несиметричного навантаження, що є особливо складним і важливим для практики.

Моделюючи зони передруйнування продовженнями тріщини з невідомими напруженнями на берегах, проблема зведена до задачі лінійного спряження Рімана, яка розв'язана в аналітичному вигляді. З умов скінченності напружень у кінці зон передруйнування і зв'язку між цими напруженнями у вказаних зонах сформульована система двох трансцендентних рівнянь відносно довжини цих зон. Розв'язок її знаходиться чисельно. Знайдені також розкриття міжфазної тріщини в її вершинах, які можуть служити для визначення можливості розвитку тріщини. Для конкретних біматеріалів проведена чисельна ілюстрація одержаних результатів і показано вплив

зсувного напруження на довжини зон передруйнування, напруження в них та на розкриття тріщини в її вершинах.

1. Loboda V., Lapusta Y., Sheveleva A. Electro–mechanical pre-fracture zones for an electrically permeable interface crack in a piezoelectric bimetals // *International Journal of Solids and Structures*. –2007. – Т. 44. – P.5538–5553.
2. Loboda V., Lapusta Y., Sheveleva A. Analysis of pre-fracture zones for an electrically permeable crack in an interlayer between piezoelectric materials. *International Journal of Fracture*, 2006. 142, № 3-4. P. 307–313. <https://doi.org/10.1007/s10704-006-9034-5>

OPTIMAL DESIGN OF WIND POWER PLANT BLADES

Degtyarev K.¹, Gnitko V.¹, Sierikova O.², Sinchenko D.³, Strelnikova O.^{1,3}

¹*A.M. Pidhorny Institute of Power Machines and Systems,*

²*National University of Civil Protection of Ukraine*

³*V.N. Karazin Kharkiv National University*

Modern wind power plants are technical systems composed of a large number of interacting components and units with various functions. Among them, the blade system of the wind turbine plays a key role. Optimal design of such structures involves the use of search procedures to determine the best set of parameters that meet given constraints and ensure the best value of the chosen optimality criterion. These procedures are well known; however, their efficiency strongly depends on the conditions under which the optimization process occurs, and it is not always possible to achieve the desired result within an acceptable time frame using any single method alone.

In the proposed study, an original hybrid optimization method was used. Its implementation allows for the effective solution of multi-parameter nonlinear programming problems, taking into account both system and functional constraints [1]. For the analysis of the stress-strain state, the finite element method and the boundary element method are applied in the work [2]. The search for optimal parameters was conducted using the method proposed in [1].

As a result of the calculations, the blade's weight was reduced by 15%, amounting to 19.5 kg. The only active constraint was the blade's displacement. The natural frequency of oscillation changed insignificantly during the calculations, and this change did not violate the predefined constraints.

Thus, the methods for calculating aerodynamic loads and analyzing the stress-strain state of wind turbine blades demonstrated high efficiency and accuracy.

References

1. Smetankina N., Semenets O., Merkulova A., Merkulov D., Misura S., Two-Stage Optimization of Laminated Composite Elements with Minimal Mass. *In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 536, 2023. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-031-20141-7_42.
2. Medvedovskaya T. Strelnikova E., Medvedyeva K. Free Hydroelastic Vibrations of

ДО ВРАХУВАННЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДВОШАРОВОЇ ПЛАСТИНИ З ДЕФЕКТАМИ

Є.А. Сторожук, І.С. Чернишенко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Розглядається циліндричний згин нескінченно довгої прямокутної пластини, яка складається з двох трансверсально-ізотропних шарів зі сталою товщиною і знаходиться під дією статичного навантаження. Віднесемо i -й шар ($i=1,2$) до прямокутної декартової системи координат $O_i x_i y_i z_i$, осі $O_i x_i$, $O_i y_i$ якої проходять паралельно поздовжнім і поперечним краям пластини, а вісь $O_i z_i$ напрямлена за нормаллю до серединної площини i -го шару.

Основні рівняння записані згідно з лінійними співвідношеннями Коші і законом Гука. Моделювання напружено-деформованого стану двошарової пластини виконано з використанням дискретно-структурного підходу [1, 2] і врахуванням деформацій поперечного зсуву та обтиснення в шарах пластини [3]. Деформування кожного шару описано співвідношеннями тривимірної теорії пружності за лінійної апроксимації залежностей компонентів вектора переміщень від поперечної координати z_i [3]. За незалежні змінні прийнято тангенціальні та нормальні переміщення внутрішньої і зовнішньої поверхонь шарів: $u_\theta^{(i)}, w_\theta^{(i)}, u_z^{(i)}, w_z^{(i)}$ ($i=1,2$).

Безпосереднє використання лінійного закону зміни переміщень за товщиною шарів при не рівних нулеві коефіцієнтах Пуассона матеріалів шарів призводить до неправильних результатів. Для компенсації вказаного явища зазвичай вводиться статична гіпотеза $\sigma_z^{(i)} = 0$. В даній роботі використана більш м'яка гіпотеза $\sigma_{z,z}^{(i)} = 0$ [4]. В цьому випадку величина $e_{z,z}^{(i)}$ не обчислюється за допомогою співвідношень Коші, а визначається з введеної статичної гіпотези $\sigma_{z,z}^{(i)} = 0$.

Розглянуто випадки ідеального та неідеального (з проковзуванням, відшаруванням, тощо) контакту між шарами пластини. Нормальні та дотичні контактні напруження визначаються з системи інтегральних рівнянь Вольтерри першого роду, розв'язок якої знаходиться за допомогою перетворення Лапласа.

Для двошарової пластини з шарнірно закріпленими поздовжніми краями досліджено вплив деформацій поперечного зсуву та обтиснення, а також дефектів типу проковзування і відшарування на напружено-деформований стан за дії рівномірного поверхневого навантаження.

Список використаних джерел

1. Piskunov V.G. An iterative analytical theory in the mechanics of layered composite systems // *Mech. Compos. Mater.* – 2003. – 39, N 1. – P. 1 – 16.
2. Марчук М.В., Пакош В.С., Харченко В.М. Власні частоти шаруватих композитних пластин-смуг з податливими до трансверсальних зсуву та стиснення складовими // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2013. – 56, № 2. – С. 151 – 156.

3. Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Оглобля А.И., Динкевич Ю.Л., Геращенко О.В. Расчет композитных конструкций с учетом расслоений. – Киев: Будівельник, 1992. – 136 с.

4. Метод конечных элементов в механике твердых тел. / Под общ. ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 480 с.

РОЗРАХУНОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНОГО РОТАЦІЙНОГО ДВИГУНА

А. М. Пасічник, Т. Ж. Надригайло, Д.В. Нежумири

panukr977@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет

Інтенсифікація різних галузей промисловості і будівництва базується на широкому застосуванні засобів автоматизації і механізації виробничих процесів. Використання технологій малої механізації підвищує продуктивність, знижує потребу в робочій силі та покращує умови праці. Серед механізованих інструментів широке застосування мають гайковерти, сверлильні, різьбонарізні, шліфувальні та зачисні машини з пневматичними ротаційними двигунами. Широке застосування пневматичних двигунів в ручних механізованих машинах пояснюється високим рівнем їх надійності, безпечності та достатньої простоти експлуатації. Основний принцип роботи пневматичного двигуна полягає в перетворенні енергії розширення стисненого повітря, яке подається до двигуна, в механічну енергію обертання його робочого валу. Разом з тим, найбільш поширені ротаційні пластинчасті двигуни мають певні недоліки: низький коефіцієнт корисної дії (ККД), швидке зношування робочих лопаток, що призводить до збільшення неефективного споживання стисненого повітря і скорочення терміну експлуатації. Тому розробка та удосконалення технічних характеристик механізованих машин є пріоритетним завданням технічної механіки і має достатньо актуальне значення для промисловості. Для вирішення наведених проблем запропоновано використовувати принципово новий пневматичний ротаційно-поршневий двигун, в конструкції якого відсутні лопатки розмежування робочих камер, що забезпечує зменшення шуму та вібрацій, рис. 1. Принцип роботи ротаційно-поршневого двигуна заснований на циклічній подачі стисненого повітря до робочої камери, тиск якого на клапан і поршень створює крутильний момент, що приводить в обертальний рух ротор двигуна. Пропонований пневматичний ротаційно-поршневий двигун є двотактним, його робочий цикл здійснюється за один повний оберт робочого валу. В робочий цикл двигуна входять такт суміщений впуск-робочий хід 240° і такт випуск – 120° повороту робочого валу двигуна.

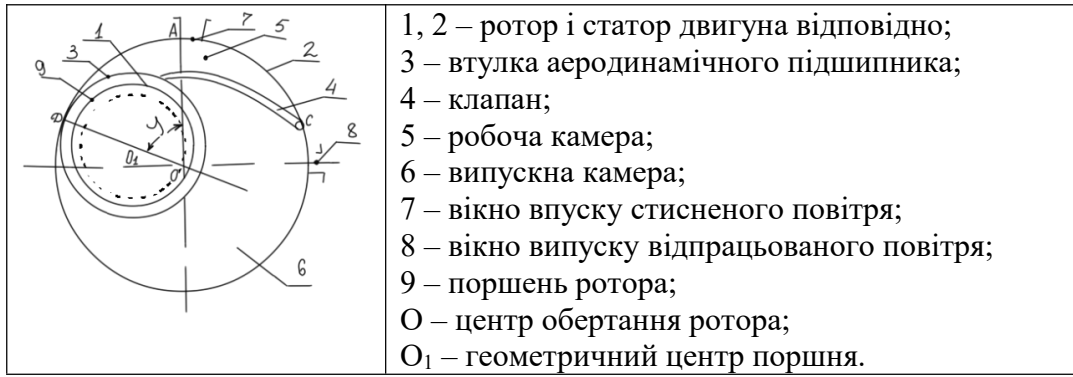


Рис. 1. Принципова схема пневматичного ротаційно-поршневого двигуна

В даному дослідженні приведені результати газодинамічного розрахунку і аналізу енергетичних параметрів пневматичного ротаційно-поршневого двигуна та оптимізації його технічних характеристик. Розрахунки оптимальних параметрів проведено для заданих габаритів, потужності та числа обертів пневматичного двигуна. Оптимізація конструкції такого двигуна дозволяє зменшити витрати енергії та підвищити його ефективність і зменшити вплив на навколишнє середовище.

Основними критеріями оптимізації параметрів двигуна є максимізація крутного моменту та мінімізація пульсацій моменту для зменшення вібрацій. Для розрахунку одиничного крутного моменту отримано наступне співвідношення:

$$m = 2 \varepsilon r \sin^2 \left[\frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\varepsilon \sin \varphi - y_d / R}{r} \right] + \frac{a \varepsilon}{2} \cos \left[\arctg \frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} - \arcsin \frac{\varepsilon \sin \varphi - y_d / R}{r} \right] \cdot \sin \left[\varphi + \arcsin \frac{\varepsilon \sin \varphi - y_d / R}{r} \right]. \quad (1)$$

Крутний момент, створюваний на валу двигуна однією робочою камерою, має виключно гармонійну форму. Для отримання рівномірного моменту доцільно застосовувати дві або три робочі камери, зміщені одна відносно одної на $2\pi/n$ радіан по колу. Для визначення оптимальної кількості робочих камер проведено розрахунки коефіцієнту пульсації крутного моменту, який характеризує співвідношення між максимальним, мінімальним та середнім значеннями крутного моменту і визначається за формулою:

$$\delta = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_s} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де M_s – сумарний момент на валу двигуна.

За результатами розрахунків встановлено, що для мінімізації пульсацій крутного моменту необхідно в конструктивну схему реалізації двигуна включити три робочі камери зі зміщенням на кут $2/3 \pi$. Крутний момент на робочому валу двигуна буде визначатись сумарним значенням крутних моментів від кожної робочої камери як показано на рис. 2.

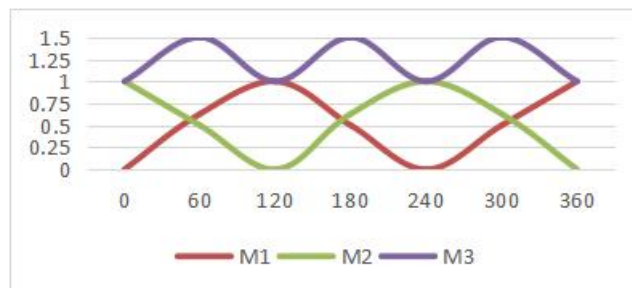


Рис. 2. Залежність крутного моменту за один робочий цикл для трьох камерного пневматичного двигуна

Теоретична потужність на робочому валу двигуна, отримувана за рахунок розширення стисненого повітря, визначається таким співвідношенням:

$$N_T = V_1 \omega \eta P_0 \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (3)$$

де V_1 – об'єм заповнення; P_0, P_1 – тиск впуску, випуску; ω – коефіцієнт стиску повітря; η – число обертів ротора двигуна за секунду; k – показник адиабати, для повітря – $k=1.4$.

Визначено також коефіцієнт використання об'єму як відношення об'єму робочої камери до габаритного об'єму двигуна:

$$K_V = \frac{1}{2\pi} \varphi - \frac{1}{2\pi} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \left(\varphi + \arcsin \frac{e \sin \varphi - y_k}{r} \right) - \frac{1}{2\pi \sqrt{b^2 + 1}} \cdot \frac{y_k}{R} + \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{a_k^2}{R} \right)^2, \quad (3)$$

що дозволило оптимізувати ефективність використання об'єму двигуна:

Результати дослідження показують, що пневматичний ротаційно-поршневий двигун має достатньо ефективні технічні характеристики порівняно з ротаційними пластинчастими двигунами. Подальша оптимізація конструктивних параметрів цього типу двигунів дозволить значно підвищити рівень їх експлуатаційної спроможності та знизити енергетичні витрати.

ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ ВІБРАЦІЙ ОБЛАДНАННЯ НА АКУСТИЧНІ ХВИЛІ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ

Ріпа М.Ю.

Дніпровський державний технічний університет
Україна, м. Кам'янське, ripami25@gmail.com

Дослідження механічних вібрацій є важливим через необхідність поглибленого розуміння фізичної природи процесів розповсюдження звукових хвиль, зокрема в контексті оптимізації розміщення джерел звукових сигналів системи екстреного оповіщення населення. Це дозволить розробити більш ефективні методи для ізоляції і ослаблення звукових хвиль, що підвищить комфорт населення у навколишньому середовищі. При цьому необхідно враховувати, що механічні коливання обладнання мають прямий вплив на рівень акустичного тиску, який породжується ними. Для дослідження цього явища важливо враховувати частотний склад шуму. Низькочастотний шум (до 400 Гц) не викликає значного дискомфорту, але з часом може спричинити негативні наслідки для організму. Високочастотний шум є більш небезпечним і може викликати порушення слуху та інші проблеми. Тому оцінка рівня звукового тиску та його частотного спектру є важливою прикладною проблемою для розробки ефективних методів зменшення негативного впливу шуму на здоров'я людини. Для цього проведено дослідження механічних вібрацій у системах з різною кількістю степенів свободи та проведено аналіз впливу амортизації на амплітуду коливань та резонанс, а також взаємозв'язку між вібраціями і звуковим тиском в спеціалізованих пристроях. Дослідження цих аспектів має також важливе значення для розробки нових методів оптимізації звукоізоляції та покращення акустичних характеристик інфраструктури промислових міст. В основному виникнення механічних вібрацій пов'язане із вимушеними та вільними коливаннями.

Вимушені коливання виникають під дією зовнішніх сил і можуть мати великий вплив на робочі характеристики обладнання. Це також важливо в контексті підвищення ефективності роботи машин та механізмів, оскільки вібрації можуть вивести їх з ладу. Для точного аналізу таких систем розглядаються математичні моделі на основі диференціальних рівнянь руху, що дозволяє оцінити рівень вібрацій і шуму в промислових системах. Зокрема, під час дослідження взаємозв'язку частот коливань у системах з кількома степенями свободи. Для таких систем аналізуються частоти власних коливань, що залежать від фізичних характеристик обладнання та його взаємодії. Визначено умови резонансу, коли під час синхронізації частот коливань амплітуда може значно збільшуватись, що небезпечно для стабільності роботи обладнання. Це дозволяє спрогнозувати потенційні проблеми і запобігти їх виникненню при проектуванні та експлуатації технічних систем.

Одним із важливих аспектів дослідження акустичних хвиль та вібрацій є передача вібрацій на конструкції, такі як електричні машини та трансформатори, а також методи зменшення відповідної взаємодії. Для цього визначено коефіцієнт передачі вібрацій, що дозволяє оцінити вплив вібрацій на навколишні конструкції та споруди. На основі встановлення залежності між механічними вібраціями та акустичними хвилями можна розробити більш ефективні методи зменшення рівня звукового тиску.

Отже, дослідження механічних вібрацій є важливим для покращення ефективності роботи технічних систем, зменшення шумового забруднення та розробки ефективних методів їх ізоляції. Розуміння процесів, що відбуваються під час коливань, дозволяє розробляти нові рішення для зменшення негативного впливу вібрацій на обладнання, навколишнє середовище та населення.

Доповіді секції: Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті (15-17 квітня 2025)

ЗМІСТ

39(11) Т.В.Крилова ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ	61
40(4) І.К. Карімов, А.О. Трубник ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ТА ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОСВІТІ	63
41(5) Т.В. Крилова, П.О. Стеблянко СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІЗ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ	64
42(13) Є. С. Курбацька, Т. М. Рудянова ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH LOW ENERGY	65
43(17) А. А. Назарян, Т. М.Рудянова ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОЦІНКИ РИЗИКІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ERP-СИСТЕМ	67
44(19) О.Д. Петров, П.О. Стеблянко НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ ТЕРМО-ПСЕВДОПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ СПЛАВІВ	69
45(25) І.О. Карпенко , О.М. Давидчик ПРОВЕДЕННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЗАНЯТЬ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ТА ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ	70
46(34) Ю.С. Тарасенко СТРУКТУРУВАННЯ АСПЕКТІВ БЕЗПЕКИ У СФЕРІ БЕЗПЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТУ	72
47(35) Ю.В. Савченко, Ю.С. Тарасенко, О.М. Сумовський ВИКЛИКИ ТА ПРОБЛЕМИ РОЗУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ІoT НА ПРИКЛАДІ ВРАЗЛИВОСТІ РОЗУМНОЇ РОЗЕТКИ VELKIN	75
48(36) Р. Р. Лабібов ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ ПЛИННОСТІ	77
49(37) Н. Д. Яковенко ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО ТА МІКРОСТРУКТУРНОГО СТАНІВ ПІВПРОСТОРУ ЗА УМОВ ТЕПЛООВОГО ОПРОМІНЕННЯ	78
50(3) О.М. Давидчик, І.О. Карпенко ДО ПИТАННЯ ЛІНІЙНИХ МЕТОДІВ НАБЛИЖЕННЯ	79
51(38) Н.М. Волосова, С. Гавріл, В. Дивак ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ПРИ ВИВЧЕННІ ОСВІТНЬОЇ КОМПОНЕНТИ «ВИЩА ТА ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА» ЗДОБУВАЧАМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ НЕМАТЕМАТИЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ	80
52(41) Ж.В. Худа , Є.А. Тонконог АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПЕТЕНТІСНОГО ПІДХОДУ ПРИ НАВЧАННІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ РІВНЯННЯМ СТУДЕНТІВ МЕХАНІЧНОГО НАПРЯМУ	82

53(56) О.М. Гулеша, П.І. Буланый ВИКОРИСТАННЯ НАБОРІВ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ ЗБІРКИ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ФОРМУВАННЯ БАЗОВИХ КОМПЕТЕНЦІЙ ІНЖЕНЕРА-ЕЛЕКТРОННИКА	85
54(57) О.М. Гулеша, М.О. Василенко ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ОСВІТІ: LTSPICE ЯК КЛЮЧОВИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН	86
55(58) О.М. Гулеша, І.П. Кізенко ЗАСТОСУВАННЯ МАТНСАД ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	87
56(59) О.М. Гулеша, О.Г. Кривоносов ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ COREL DRAW У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ	88
57(60) О.М. Гулеша, А.А. Лубенець МАТЛАВ ЯК ЗАСІБ ІНТЕГРАЦІЇ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС	89



ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Т.В. Крилова

Дніпровський державний технічний університет

Самостійна робота студентів (СРС) – невід’ємна складова навчально-виховного процесу вищої школи. Організація СРС – важка й кропітка робота. Це пов’язано з тим, що студенти, особливо першокурсники, не вміють самостійно працювати з навчальним математичним матеріалом. Їх слід навчити і привчити самостійно оволодівати знаннями, зокрема з вищої математики.

Крім додаткових занять з елементарної математики, викладачі кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ керують позааудиторною самостійною роботою студентів технічних спеціальностей.

Проведення занять з самостійного опрацювання студентами теоретичного матеріалу з вищої математики під керівництвом викладача наведено нами у роботі [1].

Проілюструємо, як навчаємо студентів самостійно розв'язувати лінійні диференціальні рівняння першого порядку методами Лагранжа і Бернуллі, застосовуючи дистанційні технології навчання.

Самостійне учіння розв'язувати лінійні диференціальні рівняння під керівництвом викладача проводиться у комп'ютерному класі. За кожним комп'ютером працює один студент.

Екран монітора поділено на дві частини. Зліва наведено поетапне розв'язання лінійного рівняння в загальному вигляді з докладним поясненням, справа – паралельне розв'язання конкретного рівняння з тими же поясненнями. (Ці відомості студенти можуть відправити електронною поштою на свій комп'ютер або переписати їх на диск чи флешку для повторювального опрацювання вдома).

Потім викладач пропонує студентам самостійно розв'язати це рівняння в зошиті.

В тому випадку, якщо студент не в змозі одразу розв'язати рівняння, йому надається можливість ще раз продивитися на комп'ютері процес розв'язання з паралельним записуванням в зошит.

Наступний етап – висвітлення на екрані іншого рівняння і тільки його загального розв'язку.

Якщо студент отримує інший розв'язок, то він має перевірити, чи задовольняє цей розв'язок диференціальному рівнянню.

В тому випадку, коли отриманий студентом розв'язок не задовольняє рівнянню, на моніторі комп'ютера висвітлюється план поетапного розв'язування з проміжними відповідями.

Наприклад. Знайти загальний розв'язок рівняння $y - y \operatorname{ctg} x = \operatorname{tg} x$ методом Лагранжа.

План розв'язування

1. Скласти відповідне лінійне однорідне рівняння.
2. Знайти його загальний розв'язок.

Відповідь: $y = C \sin x$.

3. Представити загальний розв'язок лінійного неоднорідного рівняння у вигляді загального розв'язку відповідного однорідного рівняння, вважаючи довільну сталу C невідомою функцією від x .

Відповідь: $y = C(x) \sin x$.

4. Знайти функцію $C(x)$.

Відповідь: $C(x) = \ln \left| \operatorname{tg} \frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right| + \bar{C}$.

5. Знайти загальний розв'язок лінійного неоднорідного рівняння

Відповідь: $C(x) = \left(\ln \left| \operatorname{tg} \frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right| + \bar{C} \right) \sin x$.

Після цього студент, вже не користуючись підказками, розв'язує рівняння самостійно.

Потім пропонується аналогічна процедура розв'язування тих самих диференціальних рівнянь методом Бернуллі з порівнянням отриманих загальних розв'язків.

Наступний етап заняття – це знаходження частинного розв'язку рівняння по даній початковій умові.

Запропонована методика проведення позааудиторної СРС дає в цілому достатньо добрі результати. Але, на жаль, через відсутність достатньої кількості комп'ютерних класів таку роботу викладачі математики можуть проводити з двома групами одночасно не частіше, як один раз на місяць, хоча бажано було б так організовану СРС проводити один раз на тиждень.

1. Крилова Т.В., Гулеша О.М., Орлова О.Ю. Дидактичні засади фундаменталізації математичної освіти студентів нематематичних спеціальностей університетів // Дидактика математики: проблеми і дослідження: міжнар. збірник наукових робіт. Вип. 35. Донецьк: ДонНУ, 2011. С. 27-35.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ТА ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОСВІТІ

І.К. Карімов, А.О. Трубник

Дніпровський державний технічний університет

В виробничій діяльності дотримання технології забезпечує отримання продукції з заданими властивостями та якістю. При цьому для будь-якої технології характерні системність та упорядкованість, строгий алгоритмічний порядок опису необхідних дій, спрямованість на обов'язкове досягнення заздалегідь сформульованих цілей та контроль отриманих результатів, відтворюваність (можливість багаторазового повторення в аналогічних ситуаціях). Прагнення застосувати вказані вище позитивні риси виробничих технологій до сфери освіти призвело до появи технологічного підходу в освіті і поширення таких понять як «технології навчання», «освітні технології», «інноваційні технології» тощо. При цьому для забезпечення максимального ефекту бажано поєднувати традиційні і інноваційні технології. Приклад застосування такого підходу до вивчення дисципліни «Комп'ютерні методи та засоби розв'язання інженерних задач», яка викладається в Дніпровському державному технічному університеті для здобувачів вищої освіти зі спеціальності 144 «Теплоенергетика», наведений нижче.



В наведеній схемі традиційними можна вважати компетентнісно орієнтовану та модульно-рейтингову технологію, інноваційними – різні варіанти комп'ютерно орієнтованої технології та технології інтерактивного навчання.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІЗ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

Т.В. Крилова¹, П.О. Стеблянко²

¹Дніпровський державний технічний університет

²Інститут механіки імені С. П. Тимошенка НАН України

Традиційно прикладна математика використовується для вирішення природничих задач, тобто у фізиці, хімії, біології, тощо. Проте з розвитком комп'ютерних технологій виникає все більша потреба у фахівцях, що можуть використовувати математичні знання в ІТ-технологіях. Це – розробка алгоритмів, задачі проектування, оптимізаційні задачі, теорія керування і, звичайно, аналіз даних. Виходячи з вище зазначеного, на думку авторів, є доцільність при вивченні базових математичних дисциплін, вводити задачі, які можна розв'язувати, програмуючи в різних середовищах (Mathcad, Matlab, Python та інші).

Програми з «Прикладна математика» для здобуття освітніх ступенів бакалавр, магістр та доктор філософії мають на меті підготовку фахівців, які зможуть використовувати математичний апарат у різних професійних сферах людської діяльності, зокрема, розробляти та досліджувати математичні та комп'ютерні моделі, створювати та використовувати алгоритми, ефективно застосовувати знання в техніці, фізиці та інших галузях науки.

Значну увагу в програмах приділяється базовим математичним дисциплінам: Математичний аналіз, Лінійна алгебра, Теорія ймовірностей, Математична статистика, Диференційні рівняння.

Крім традиційних дисциплін широко вивчаються рівняння математичної фізики, числові методи, а також дисципліни, в яких застосовується математичне моделювання. В деяких програмах передбачено дисципліни з програмування, аналізу даних, захисту інформації.

Одним із ключових навиків та вмінь фахівців із прикладної механіки і математики, на думку авторів, є вміння програмувати в різних середовищах та швидко цьому навчатися. Вміння розв'язувати прикладні задачі в різних середовищах за допомогою написання власної програми дає можливість фахівцю мати ширші можливості на ринку праці.

ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH LOW ENERGY

Є. С. Курбацька, Т. М. Рудянова

Університет митної справи та фінансів

Технологія Bluetooth використовує неліцензуючий радіоканал, в якому будь-які дані можуть містити перешкоди. Саме тому, з точки зору безпеки, будь-які дані можуть бути змінені при передачі по радіоканалу.

Технологія Bluetooth Low Energy (надалі BLE) створювалася для девайсів, які орієнтовані на низьке електроспоживання. Через це з авторизація, аутентифікація та шифрування каналу даних є обов'язковими.

Оскільки технологія BLE використовується в багатьох сферах (таблиця 1), то цілісність каналу передачі даних є критичною для деяких з них. Такими прикладами є медичні датчики, почтомати, системи самоорганізації роботів, тощо. Встановлення захищеного і авторизованого каналу даних для них є критичним [1].

Таблиця 1. Приклади сфер застосування Classic Bluetooth та Bluetooth Low Energy

Спосіб комунікації	Класичний Bluetooth	Bluetooth Low Energy		
	Один до одного	Один до одного	Один до багатьох (broadcast)	Багато-до-багатьох (mesh)
Сфера застосування	Потокова аудіо передача (наприклад, в бездротових навушниках)	Застосування для передачі даних (наприклад, в спортивному та фітнес обладнанні,	Застосування для визначення локації (наприклад, для навігації в	Застосування в якості мережі для: систем контролю, систем моніторингу, автоматичних систем (автоматичне оновлення цінників

	та бездротовій колонці)	медичному обладнанні.)	приміщеннях та відстеження об'єктів)	в магазинах)
--	-------------------------------	---------------------------	---	--------------

Специфікація технології BLE передбачає можливості для створення захищеного каналу даних, але всі вони спираються на дії користувача, або ж, додаткові канали передачі даних. Проте, не завжди підходить для девайсів в яких використовується дана технологія.

Специфікація технології передбачає декілька наступних режимів:

- just works,
- OOB,
- passkey pairing,
- numeric comparising.

Усі режими, окрім just works, вимагають дій користувача для порівняння або введення спільного секрету. При цьому, між девайсами використовується протокол Діффі-Геллмана, який унеможливує атаки пасивного прослуховування.

Наразі, виконувати активні атаки не є проблемою для атакуючої сторони, оскільки технічні засоби і програмний код для таких атак не складний і публічно доступний. Таким чином, атакуюча сторона може провести атаку Man-in-the-middle, під час якої буде створено два секрети з використанням протоколу Діффі-Геллмана, а посередні знаходитиметься девайс, який буде пересилати усе корисне навантаження між кінцевими девайсами, маючи можливість контролювати дані.

У випадку активної атаки єдине що може захистити канал комунікації (при умові використання лишень стандартних засобів захисту) є дії користувача. Наприклад, натискання кнопки, введення секрету, та інше. Проте, вище вказані дії не підходять для автоматичних систем, чи систем, які працюють на боці кінцевого користувача. Захистити канал комунікації в такому разі можна лише за допомогою шифрування з авторизацією на основі секрету унікального для кожного девайсу. Таким секретом може бути сертифікат і приватний ключ. Усі сертифікати повинні бути завірени єдиним центром сертифікації а приватний ключ має бути унікальним для кожного девайсу.

В такому разі, використання протоколу ECDH (Протокол Діффі-Геллмана на еліптичних кривих) з використанням приватних і публічних ключів, відповідні сертифікати яких є попередньо перевіреними цими девайсами, створить спільний ключ, який не зможе отримати атакуюча сторона, а також, не зможе провести атаку Man-in-the-middle якщо не матиме валідних сертифікатів, завірених тим самим центром сертифікації.

В подальшому, використання отриманого секрету для шифрованої передачі параметрів звичайної версії Діффі-Геллмана допоможе створити секрет сесії, який можна буде використовувати для передачі даних. За умови періодичної зміни секрету сесії буде гарантуватися, що компрометація одного секрету не призведе до компрометації усіх переданих даних, а використання протоколу Діффі-Геллмана для секрету сесії гарантує неможливість розшифрувати попередньо збережений трафік за умови відсутності компрометації приватних ключів обох девайсів.

Список використаної літератури

1. The Difference Between Classic Bluetooth and Bluetooth Low Energy. 2021. URL: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/the-difference-between-classic-bluetooth-and-bluetooth-low-energy>. (Дата звернення 10.04.2024)

2. Hariharan M. Master Thesis Simulation Models for the Performance Analysis of Bluetooth Low Energy In Multi-device Environment. 2017. с. 16-22.
3. Heydon R. Bluetooth Low Energy The Developer's Handbook. 2012. - 218 с.
4. Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE): всебічний огляд. 2023. URL: <https://cqr.company/ua/wiki/protocols/bluetooth-low-energy-ble-a-comprehensive-overview/> . (Дата звернення 10.04.2024)
5. Developer Study Guide: Bluetooth Low Energy Security. 2023. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/bluetooth-le-security-study-guide-v11pdf/266648142/> (Дата звернення 10.04.2024)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОЦІНКИ РИЗИКІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ERP-СИСТЕМ

А. А. Назарян , Т. М.Рудянова

Університет митної справи та фінансів

В сучасному бізнес-середовищі оптимізація процесів оцінки ризиків стає ключовим завданням для забезпечення стійкості та успішності підприємств. Завдяки використанню ERP-систем (Enterprise Resource Planning – планування та управління ресурсами підприємства) та їх можливостям в області аналітики та оптимального управління, компанії отримують засоби для ефективного виявлення, аналізу та управління ризиками на різних рівнях своєї діяльності. Управління ризиками на підприємствах можна визначити, як комплекс заходів, що включає ідентифікацію, аналіз якості ризиків та прийняття відповідних рішень, спрямованих на зниження імовірності та ступеня їхнього впливу на процес діяльності підприємства, результати та кінцеві продукти виробництва. ERP-системи є важливим інструментом для автоматизації бізнес-процесів на підприємствах. Вони інтегрують в себе різноманітні функціональні модулі, включаючи фінанси, управління запасами, виробництво, кадри та багато інших, що дозволяє підприємствам оптимізувати свою діяльність та підвищувати її ефективність. Ключовим аспектом впровадження ERP-системи та використання відповідного програмного продукту є глибокий не тільки аналіз специфіки діяльності підприємства, його організаційної структури, бізнес-процесів, відповідних їм потоків інформації, але ж й інформаційних потреб і запитів користувачів цієї системи в процесі управління діяльністю підприємства для розуміння кінцевого результату після його впровадження.

Одним з ключових аспектів використання ERP-систем є їх можливості в області аналізу даних та виявлення ризиків [1]. Завдяки цьому підприємства можуть:

1. Централізувати дані. ERP системи дозволяють збирати та обробляти дані з різних джерел, включаючи фінансові звіти, дані з управління запасами, звіти з виробництва та інші.
2. Аналізувати дані в реальному часі. ERP-системи надають можливість аналізувати дані в реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні ризики та приймати відповідні заходи.
3. Ідентифікувати та класифікувати ризики. За допомогою аналітичних інструментів ERP систем можна ідентифікувати та класифікувати різноманітні види ризиків, включаючи фінансові, виробничі, логістичні та інші.

4. Прогнозувати ризики та їх наслідки. Аналітичні засоби ERP-систем дозволяють побудувати моделі прогнозування ризиків та їх потенційних наслідків для більш ефективного управління ними.

5. Впроваджувати стратегії мінімізації ризиків. На основі аналізу даних ERP системи надають можливість впроваджувати стратегії мінімізації ризиків, включаючи розробку планів реагування на ризики, створення запасних планів та інші заходи.

6. Моніторинг та звітність. ERP-системи дозволяють проводити моніторинг ризиків на постійній основі та генерувати звіти з результатами аналізу ризиків.

Для ефективного впровадження оптимізованих процесів оцінки ризиків на підприємствах за допомогою ERP-систем важливо враховувати наступні аспекти:

- Централізувати дані. ERP-системи дозволяють збирати та обробляти дані з різних джерел, включаючи фінансові звіти, дані з управління запасами, звіти з виробництва та інші. Це дозволяє підприємствам мати повний обсяг інформації для аналізу ризиків.

- Аналізувати дані в реальному часі, оскільки ERP системи надають можливість аналізувати дані в реальному часі.

- Ідентифікувати та класифікувати ризики. За допомогою аналітичних інструментів ERP систем можна ідентифікувати та класифікувати різноманітні види ризиків, включаючи фінансові, виробничі, логістичні та інші.

- Прогнозувати ризики та їх наслідки. Аналітичні засоби ERP систем дозволяють побудувати моделі прогнозування ризиків та їх потенційних наслідків для більш ефективного управління ними.

- Впроваджувати стратегії мінімізації ризиків, включаючи розробку планів реагування на ризики, створення запасних планів та інші заходи.

- Моніторинг та звітність. ERP-системи дозволяють проводити моніторинг ризиків на постійній основі та генерувати звіти з результатами аналізу ризиків для керівництва та зацікавлених сторін [2].

- На сьогоднішній день існує багато ERP-систем, які пропонуються різними постачальниками програмного забезпечення:

- SAP є одним з провідних постачальників ERP-рішень у світі. SAP ERP пропонує широкий спектр функціональних модулів, включаючи фінанси, управління ланцюгом постачання, виробництво, кадри та інші. Система SAP ERP відома своєю гнучкістю та можливістю налаштування під потреби конкретного підприємства.

- Oracle ERP Cloud є хмарною ERP-системою, яка надає різноманітні функціональність для управління фінансами, виробництвом, управління постачанням та іншими аспектами бізнесу. Вона пропонує інтегрований набір послуг для підвищення продуктивності та ефективності підприємства.

- Microsoft Dynamics 365 є іншою популярною ERP-системою, яка пропонує широкий спектр модулів для управління фінансами, продажами, обслуговуванням клієнтів, операціями та іншими аспектами бізнесу. Вона відрізняється відкритістю для інтеграції з іншими продуктами Microsoft та можливістю розширення за допомогою додаткових модулів та рішень [3].

- Infor CloudSuite є хмарною ERP-платформою, яка пропонує рішення для різних галузей промисловості та сфер бізнесу.

Отже, використання ERP-систем для оптимізації процесів оцінки ризиків на підприємствах дозволяє компаніям забезпечувати стійкість та успішність у сучасному конкурентному бізнес-середовищі, а також ефективно управляти ризиками для досягнення своїх стратегічних цілей, забезпечивши прибутковість коштів, вкладених в автоматизацію виробничих та управлінських процесів, а також впровадження інноваційних технологій.

Список використаних джерел

1. Що таке ERP-система? Для чого вона потрібна бізнесу | CleverForms. URL: <https://clever-forms.com/shho-take-erp-sistema-dlya-chogo-vona-potribna-biznesu/> (дата звернення: 09.04.2024).
2. 6 переваг ERP системи для підприємства | Wezom. URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/yak-rozrobka-vlasnoyi-erp-sistemi-vplivaje-na-pidprijemstvo> (дата звернення: 09.04.2024).
3. Microsoft Dynamics 365 for Finance and Operations - ERP для малого та середнього бізнесу. URL: <https://erp.org.ua/microsoft-dynamics-365-for-finance-and-operations/> (дата звернення: 09.04.2024).

НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ ТЕРМО-ПСЕВДОПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ СПЛАВІВ

О.Д. Петров¹, П.О. Стеблянко²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро
²Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Одним із аспектів розв'язання нестационарних задач для непружних тіл є вибір фізичних співвідношень між напруженням і деформацією. Такий вибір узгоджується з експериментами і тісно пов'язаний з процесами деформації, що відбуваються в матеріалі тіла. У загальному випадку величини деформації є функціями процесу напружень і перепадів температур, які визначаються особливостями всього попереднього процесу зміни фізичних факторів, а не тільки поточними значеннями. Для уточнення фізичних співвідношень сформульовано нову нелінійну феноменологічну модель, яка точніше в порівнянні з відомими моделями описує властивості сплавів з пам'яттю форми та термопсевдопластичну поведінку матеріалу в точці. У цьому випадку додатково необхідно знати положення в тілі фронту фазового переходу і функцію кінетичної реакції.

Узагальнена залежність між напруженням і деформацією в матеріальній точці моделюється трьох кривих $\varepsilon = \psi_i(\sigma), i = 1, 2, 3$. Перша з них $\varepsilon = \psi_1(\sigma), \sigma \in [0; \sigma_M], \varepsilon \in [0; \varepsilon_M]$ відповідає пружній поведінці матеріалу на початку деформування. Третя функція $\varepsilon = \psi_3(\sigma), \sigma > \sigma_m, \varepsilon > \varepsilon_m$ задає псевдопружну ділянку діаграми. Зазначимо, що при цьому повинні виконуватись умови $\sigma_M > \sigma_m, \varepsilon_M < \varepsilon_m$. Друга функція $\varepsilon = \psi_2(\sigma), \sigma \in [\sigma_m; \sigma_M], \varepsilon \in [\varepsilon_m; \varepsilon_M]$ моделює нестійку ділянку діаграми матеріалу в точці, яка виникає при фазовому переході. Змінна деформація фазового перетворення визначається наступним чином $\varepsilon_T = \psi_3(\sigma) - \psi_1(\sigma)$.

Для побудови фізичних залежностей між тензорами напруження та деформації необхідно додатково знати положення фронту фазового переходу та функцію кінетичного відгуку у зразку $\dot{s} = \Phi(f); F = f - f_r$. Ця задача вирішується введенням поняття рушійної сили, яка визначається наступним чином $f(\sigma) = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \varepsilon(\sigma) d\sigma$, де $\sigma_0 = (\sigma_m + \sigma_M)/2$.

Для визначення положення фронту фазового переходу і функції кінетичного відгуку в тілі записується і попередньо розв'язується допоміжна система двох інтегродиференціальних рівнянь. У результаті в загальному випадку можна визначити дотичний модуль інтегральної діаграми зразка. Тензор повної деформації можна представити у вигляді суми пружної складової, стрибка деформації при фазовому переході, пластичної деформації та деформації, викликані зміною температури. Розв'язавши задачу за геометрією траєкторії деформації, можна судити про достовірність використовуваних визначальних співвідношень. Класичні діаграми матеріалів являють собою криву, що охоплює сімейство діаграм матеріалів у точці, які побудовано за певними законами зміни швидкості фронту розриву деформацій. Користуючись розробленою методикою отримано відповідні ділянки діаграми і при пружному розвантаженні зразка починаючи з наперед заданої точки. Ділянка пружного розвантаження вважалась паралельною до ділянки при пружному навантаженні. Таке припущення про механізм розвантаження лише в загальних рисах відображає реальну картину деформації матеріалу при малих деформаціях. При великих деформаціях (10% і більше) розвантаження зразка буде нелінійним.

Проведено експериментальне обґрунтування нелінійного варіанту феноменологічної моделі поведінки матеріалу з пам'яттю форми. Ця модель має можливість кількісно визначити складну взаємодію між складовими тензорів напруження, деформації, температурою, та швидкістю навантаження матеріалу, що також підходить для моделювання рівня суцільного середовища. Узагальнено співвідношення теорії пластичності теорії течії з кінематичним і поступальним зміцненням у випадках деформації термо-псевдо-пружно-пластичного матеріалу.

ПРОВЕДЕННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЗАНЯТЬ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ТА ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ

Карпенко І.О., Давидчик О.М.

Відокремлений структурний підрозділ «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Українського державного університету науки і технологій»

На сучасному етапі розвитку освіти, науки і технологій, актуального значення набуває проблема дистанційного та змішаного навчання як особливого процесу набуття знань, умінь, навичок, заснованого на застосуванні спеціальних засобів інформаційно-комунікаційних технологій. Дистанційна освіта має достатньо багато переваг перед заочною формою навчання, одночасно поєднуючи засоби та методи останньої та денної форми. У зв'язку із запровадженням дистанційної освіти важливим є вивчення та аналіз видів занять, які використовуються при дистанційному навчанні. Дослідження видів дистанційних занять дозволить виявити їх особливості та визначити напрямки вдосконалення проведення занять за дистанційною формою. Дистанційне навчання передбачає взаємодію викладачів зі здобувачами освіти між собою дистанційно на відстані, включаючи практично усі форми, методи та засоби, притаманні навчальному процесу. Причому дистанційне навчання реалізується через специфічні засоби телекомунікаційних технологій, які забезпечують інтерактивність процесу навчання. Методи та засоби навчання у вищих навчальних закладах повинні відповідати сучасним вимогам до освіти майбутніх спеціалістів

При викладанні предметів у коледжі проводяться усі типи занять: лекційні, практичні та семінарські. Звісно методика проведення занять є різною. Проте проблеми, які доводиться вирішувати, єдині – це обмеженість часу, та різні технічні можливості викладачів та здобувачів освіти.

Основними видами навчальних занять за дистанційною формою навчання є: лекція, семінар, практичні заняття, лабораторні заняття, консультації та інші. Лекція, консультація, семінар проводяться зі здобувачами освіти дистанційно у синхронному або асинхронному режимі відповідно до навчального плану. Отримання навчальних матеріалів, спілкування між суб'єктами дистанційного навчання під час навчальних занять, що проводяться дистанційно, забезпечується передачею відео-, аудіо-, графічної та текстової інформації у синхронному або асинхронному режимі. Практичне заняття, яке передбачає виконання практичних робіт, відбувається дистанційно в синхронному або асинхронному режимі. До інших видів навчальних занять при здійсненні навчального процесу можуть відноситись ділові ігри, виконання проектів у групах тощо.

Проаналізувавши комп'ютерні програми, які може використовувати викладач для здійснення дистанційного навчання, можна виділити найбільш зручний додаток Google Classroom. Він є безкоштовним сервісом для навчальних закладів та некомерційних організацій, який надає такі можливості: створення електронного класу для конкретної навчальної групи з кожного предмету, створення оголошень для здобувачів освіти, розташування в класі лекційного матеріалу у вигляді конспекту або відеолекції, проведення тестування зі створенням електронної відомості, використання електронного конструктора для перевірки теоретичного матеріалу, отримання результатів роботи здобувачів освіти у вигляді скріншотів, створення коментарів до будь якої публікації та багато інших можливостей.

Кожне теоретичне заняття викладачів коледжу в Google-класі обов'язково містить конспект, який проілюстрований рисунками, схемами, таблицями тощо. До конспекту додається відеопояснення або презентація за темою.

Пояснення теми зручно проводити за допомогою демонстрації екрану. Але слід врахувати, що на екрані краще демонструвати саме зображення досліджуваного об'єкту, а його властивості вже описувати словесно. Демонстрація лише тексту призводить до того, що здобувачі освіти гірше засвоюють матеріал, не задіюють різні види пам'яті.

Практичне заняття ставить за мету на основі засвоєних системних знань включати здобувачів освіти у різні види самостійної діяльності - практичної, інтелектуальної, предметної. При дистанційному навчанні саме практичні заняття важливо проводити таким чином, щоб кожен здобувач освіти мав можливість виконати запропоновані завдання. Не слід обирати платні додатки або такі, яких немає у вільному доступі.

На практичному занятті доцільно використовувати спільні документи, за допомогою яких можна підготувати звіти зі спільних проектів, лабораторних робіт, виконувати розрахунки, будувати діаграми, заповнювати таблиці, виконувати спільні рисунки, схеми, презентації.

Практичне заняття можна провести класичним методом за допомогою дошки та маркерів, але проводити його за допомогою додатку Meet. Таке заняття фактично імітує процес роботи в аудиторії, при якому йде живе спілкування. Недоліком такого заняття є те, що кожен здобувач освіти повинен мати можливість працювати саме в заданий час.

Для тих, хто не зміг бути присутнім на заняття, доцільним є перегляд запису проведеного заняття. Це звісно можна зробити за допомогою камери телефону, але такі файли мають великий об'єм і з ними потім важко працювати.

Зручною програмою для запису відео та аудіо є Open Broadcaster Software (OBS). OBS є вільним і відкритим набором програм для запису відео і потокового мовлення.

OBS забезпечує перехоплення відео і звуку з пристроїв і джерел у реальному часі, компонування сцен, декодування, запис і мовлення.

Для перевірки практичних знань зручно використовувати тести, створені в Гугл формах. В тести зручно включати як практичні так і теоретичні питання. Ще одним варіантом перевірки знань може бути практичне завдання у вигляді інтерактивної вправи. У цьому випадку така вправа виконує функцію задачника з відповідями.

Використання комп'ютерних технологій, зокрема додатків Google, дозволяє викладачу урізноманітнити форми роботи як теоретичних так і практичних занять, спростити перевірку тестів, оскільки її виконує система самостійно, творчо підійти до освітнього процесу. Здобувач освіти, який навчається дистанційно, має постійний доступ до матеріалів курсу навчання, виконує завдання, дотримуючись встановлених термінів, підтримує зв'язок із викладачем, який за необхідністю може надати консультацію. За допомогою тренувальних тестів можна підготуватися до контрольної, семінару або заліку.

СТРУКТУРУВАННЯ АСПЕКТІВ БЕЗПЕКИ У СФЕРІ БЕЗПІЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

Ю.С. Тарасенко

Університет митної справи та фінансів

Розвиток безпілотного автотранспорту (БПАТ) стає з кожним роком дедалі пріоритетнішим завданням у сфері сучасної життєдіяльності соціуму: у промисловій і військовій галузях у вигляді спеціалізованої техніки (машин) різного призначення, а також у соціально-споживчій, - у вигляді таксі, особистого та громадського транспорту. Причому безпека їхньої експлуатації, як об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) [1], зароджується з побудови моделі пізнання гіпотетичних інформоб'єктів з апріорним їхнім захистом від можливих кібератак та інцидентів, тобто від різноманітних загроз природного та штучного походження [2], та її подальшої реалізації згідно з державними (на рівні ДСТУ) та міжнародними (на рівні ISO/IEC) правовими документами [3, 4]. Ці стандарти відображають особливості сучасного рівня інформаційних технологій (принципи, підходи, реалізації), але, на жаль не містять наскрізних шкал цінності і переліків вимог безпеки до використовуваних систем захисту. Хоча очевидно, що від характеру (навмисних або випадкових) впливів природного або штучного походження можливими мають бути негативні наслідки як безпосередньо для самої інформації і об'єктів її первинного виникнення, так і відповідної підтримуючої інфраструктури. Однак, при використанні стандарту ISO/IEC 15408, який визначає профіль захисту для підтримуючої інфраструктури з необхідним її рівнем, ймовірні втрати виражаються лише у лінгвістичній формі вигляду «ризик середній». У зв'язку з чим [5], сутність поняття (терміну) «інформація» доцільно розглядати з позицій критично важливого об'єкта, і, відповідно, до неї (інформації) може бути застосовано увесь арсенал технічних і програмно-апаратних засобів захисту як від гіпотетично критичному об'єкту пізнання, особливо під час реалізації технологій створення БПАТ.

Такі технології в процесі створення безпілотного автотранспорту потребують: розпізнавання об'єктів довкілля та свою (автомобіля) локалізацію в ньому; розвиток навичок спільного спілкування з аналогічними «ві за ві», використовуючи при цьому інтернет або комп'ютерно-лазерний зір з метою ефективного та безпечного переміщення в автомобільному потоці; безаварійної маневреності й паркування за

допомогою спеціальних радіофізичних комунікаційних систем та багато іншого. Усе це стимулює модернізацію та подальший розвиток інтелектуальних можливостей і в інших сферах машинобудування (наприклад, у підземній, - у вигляді метро, та у підводній сферах діяльності), що особливо актуально під час реалізації безпілотних автомобілів і літальних апаратів. При цьому фактично озвучують (ставлять і розв'язують) завдання експлуатації та водіння автотранспорту у вигляді моделювання технічних видів людської діяльності, які традиційно вважають інтелектуальними. Це твердження цілком правомірне, оскільки в поняття інтелекту, як спільно спільного для людини і «машини-робота», входить їхня здатність (що виявляється на основі попереднього практичного досвіду для людини та здійснюється за допомогою комп'ютерної бази даних для робота) створювати й реалізовувати алгоритми та відповідні програми самонавчання під час розв'язання завдань певного класу складності. Тому досить переконливим є використання інтелектуальних систем під час розв'язання індивідуальних задач конкретної предметної області, апостеріорні знання про яку зберігаються в пам'яті самої системи.

Доцільно зазначити, що з 1 серпня 2024 року в Європейському Союзі набув чинності перший у світі нормативний акт щодо штучного інтелекту [6], де більшість норм закону про штучний інтелект (ШІ) почнуть діяти вже з 2 серпня 2026 року. Ухвалені в законі суворі вимоги для ШІ-систем із високим ризиком слід відносити і до розроблення безпілотних автомобілів, і до їхньої практичної реалізації, які гарантовано зобов'язані забезпечувати довіру та захист фундаментальних прав людей навіть від гіпотетичного апріорного їхнього (ризиків) впливу. Для таких систем з високим ризиком негативного впливу передбачено обов'язкову реєстрацію їхньої активності з поданням чіткої інформації для користувачів, включно з дотриманням допустимих рамок відповідності на кібербезпеку. Ба більше, системи на основі ШІ, які здатні піддавати явній загрози основні права людей, будуть заборонені. Причому вже в листопаді 2024 року США, ЄС, Великобританія і Китай підписали спільну декларацію, в якій говориться, що штучний інтелект потенційно має катастрофічний ризик для людства [7]. У зв'язку з цим апріорну безпечну експлуатацію безпілотного автотранспорту у вигляді ОКІ доцільно аналізувати з позицій гіпотетичного захисту як від хакерських атак, так і атак з боку внутрішньосистемних збоїв і зовнішніх засобів радіоелектронного (електромагнітного) ураження. При цьому аналогічному захисту підлягає і його (БПАТ) супутня інформація, що також доцільно розглядати її з позицій критично важливого об'єкта (див. рис.). Фактично маємо стійку взаємну кореляцію між БПАТ як об'єктом-джерелом інформації, безпосередньо самою інформацією та об'єктом сприйняття і подальшого опрацювання інформації щодо навколишнього середовища.

У контексті викладеного та в продовженні робіт [2,5] щодо застосування БПАТ як ОКІ використовуємо (див. рис.) «Підсистему підтримки прийняття рішень», яка, згідно концепції управління ризиками з позиції "ризик-орієнтоване мислення" [8, п.0.3.3], здатна забезпечувати планування і впровадження будь-якої діяльності з управління та контролю ризиків що до вибору засобів захисту у межах ISO/IEC TR 13335-4:2000, IDT.



Саме з позицій ризик-інформаційної безпеки ОКІ в цій структурно-лінгвістичній схемі відображені:

I. Організаційні та фізичні засоби захисту загального застосування: 1.1. Керування інформаційною безпекою та політика безпеки. 1.2. Перевіряння узгодженості безпеки. 1.3. Реагування на порушення. 1.4. Персонал та питання експлуатації. 1.5. Планування неперервності бізнесу. 1.6. Фізична безпека;

II. Специфічні засоби захисту інформаційної системи: 2.1. Ідентифікація та автентифікація. 2.2. Контролювання логічного доступу та аудит. 2.3. Захист від зловмисного коду. 2.4. Керування мережею. 2.5. Криптографія;

III. Засоби захисту відповідно до проблем (від утрат конфіденційності; цілісності; доступності; спостережності; автентичності та надійності) та загроз у межах забезпечення їх безпеки: 3.1. Засоби конфіденційності. 3.2. Засоби контролю цілісності. 3.3. Засоби захисту доступності. 3.4 Засоби захисту з позиції спостережності, автентичності та надійності.

Отже, навіть в умовах багаторівневої системи перешкод, жодна пізнавальна модель не може одночасно виконувати необхідно безліч завдань захисного напрямку. Проте в транспортній галузі загального застосування нівелювання ризик-інформаційних загроз БПАТ зобов'язані завжди бути успішно реалізованими. Тому, радіофізичні системи як засоби виявлення, дозволу та вимірювання аналогічних собі «ві за ві» та навколишнього середовища у вигляді схемотехнічної реалізації кореляційних радіолокаційних пристроїв ближньої взаємодії з шумоподібним безперервним надвисоко частотним (або лазерним) зондувальним сигналом здатні забезпечувати не тільки скритність своєї штатної роботи, а й захист від несанкціонованих на них впливів у процесі інформаційної підтримки прийняття рішень при ідентифікації, наприклад, нештатної ситуації бортових систем БПАТ. При цьому можна, підключаючи автономний режим селекції через гребінчастий фільтр з апріорно керованим графіком виходу в ефір, значно знизити рівень неприйнятних ризиків у період експлуатації БПАТ і навіть звести їх до нуля, використовуючи сучасні системи екстреного гальмування і стабілізації, які щороку запобігають тисячам дорожньо-транспортних пригод.

Список використаних джерел:

1. Закон України Про критичну інфраструктуру № 1882 - IX від 16.11.2021р. // Голос України. – № 236 (14.12.2021).

2. Ю.С.Тарасенко, В.Ю.Клим The methodology of building the cognitive model of critical infrastructure's security. Pp. 38-51. Prospektive globale wissenschaftliche trends. Monographic series «European Science». Book 11. Part 1. Published by: ScientificWorld-NetAkhatAV. Karlsruhe, Germany 2022.

3. ДСТУ ISO 31000 2018. (ISO 31000:2018, IDT) Менеджмент ризиків. Принципи та настанови. Наказ від 29.11.2018 № 446. Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). З наданням чинності від 2019–01–01.

4. 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.

5. 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.

6. REGULATION (EU) 2024/1689 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024, laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance) Official Journal of the European Union. EN L series. 12.7.2024.

7. Наталья Кава. В ЕС вступил в силу закон о регулировании искусственного интеллекта. РБК-Україна: <https://www.rbc.ua> > ... > Новини від 01.08.2024.

8. ISO 9001-2015. Международный стандарт. Системы менеджмента качества – Требования. Quality management systems — Requirements. Пятая редакция. 2015-09-15.

ВИКЛИКИ ТА ПРОБЛЕМИ РОЗУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ІoT НА ПРИКЛАДІ ВРАЗЛИВОСТІ РОЗУМНОЇ РОЗЕТКИ BELKIN

Ю.В. Савченко, Ю.С. Тарасенко, 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 постійним запам'ятовуючим пристроєм (ПЗП) 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.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ ПЛИННОСТІ

Р. Р. Лабібов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Із відомих у літературі експериментальних даних про одновісне розтягування зразка, виготовленого з цього матеріалу було отримано константи матеріалу, необхідні для описаної в [1,2] моделі пластичної поведінки. Для дослідження накопичення пластичної деформації у стані плинності при циклічному навантаженні вводиться параметр η , який визначає прогрес процесу плинності. На самому початку плинності після подолання межі пружності $\eta=0$. Кожний цикл навантаження забезпечує деякий приріст параметру $\Delta\eta$. Стан плинності закінчується при $\eta=1$, після чого починається процес зміцнення. Таким чином, умова плинності записується як $\Delta\eta < 1$.

Опис моделі. Розглядається чистий згин полоси (що відповідає поздовжньому перерізу балки, симетричної по ширині) постійної ширини під дією циклічного згинального моменту $M(t)$ амплітуди M_0 (рис. 1). Полосу виготовлено із матеріалу з властивістю до пластичної локалізації на майданчику плинності (сплав на основі нікелю та інших металів).

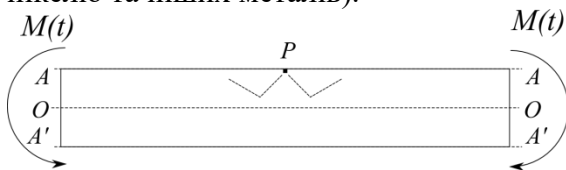


Рис. 1. Чистий згин полоси під дією циклічних згинальних моментів



Рис. 2. Оцінка розвитку області локалізації в околі початкової недосконалості

На вертикальній осі симетрії полоси введено початкову недосконалість P у вигляді скінченного елемента з межею плинності, що становить 80% від межі плинності іншого матеріалу.

Результати моделювання процесу пластичної деформації при поступовому накопиченні циклів згинального моменту подано на рис. 2, де представлено область розмірами 6,88x5 см. Нижня границя області співпадає з нейтральною лінією $O-O$ на рис. 1, верхня границя співпадає з верхньою границею полоси $A-A$ на рис. 1, а ліва границя – з вертикальною віссю симетрії полоси. Вузол скінченно-елементної сітки з початковою недосконалістю знаходиться в верхньому лівому куті. Ізолінії та градація кольорів відповідають кількості циклів згинального моменті, якої достатньо для вичерпання майданчика плинності і переходу до стану пластичного шарніру. Відтінки від темнішого до світлішого відповідають 250, 500, 750, 1000 та 1500 циклів.

Висновки. За допомогою чисельних експериментів можливо проводити оцінку меж міцності і стійкості для елементів конструкцій, виготовлених з досліджуємого класу матеріалів.

Список використаних джерел

1. Лабібов Р. Р., Черняков Ю. А. Феноменологическая теория пластического течения на площадке текучести. *Вісник Дніпропетровського університету: Серія Механіка*. 2016. № 5 (24). С. 99–107.
2. Labibov R. R., Khodanen T. V. Development of slip line of plasticity localization in construction materials. *Scientific journal of TNTU*. Tern.: TNTU, 2024. Vol. 116. No. 4. P. 70–77.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО ТА МІКРОСТРУКТУРНОГО СТАНІВ ПІВПРОСТОРУ ЗА УМОВ ТЕПЛОВОГО ОПРОМІНЕННЯ

Н. Д. Яковенко

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

У даній роботі досліджуються основні закономірності термомеханічних процесів за умов теплового імпульсного навантаження півпростору з врахуванням мікроструктурних перетворень (МСП). Мета роботи передбачає: 1) дослідження поширення хвиль напружень та залишкового напружено-деформованого стану в півпросторі; 2) аналіз впливу залежності непружних характеристик матеріалу від фазового складу. Мікроструктурні перетворення враховуються, по-перше, через термотрансформаційну деформацію, яка враховує зміни об'єму при фазових перетвореннях та зміні температури і входить в об'ємну складову закону Гука; по-друге, через залежність непружних характеристик, зокрема границю текучості та тимчасовий опір, від фазового складу матеріалу. Використовується модель течії Боднера-Партома [1], яка узагальнена на випадок мультифазового складу матеріалу. Параметри моделі течії, які відповідають за границю текучості та тимчасовий опір матеріалу, для окремих фаз визначаються за допомогою лінійного правила сумішей на основі експериментальних даних. Суттєвими особливостями моделі є наступні: закон течії Прандтля – Рейса; кінетичне рівняння, яке співвідносить швидкість непружної деформації з напруженням і змінним зміцненням; еволюційні рівняння для параметрів ізотропного зміцнення. Сформульована задача розв'язується чисельно з використанням часових схем Кранка-Нікольсона та Ейлера з автоматичним вибором кроку, а також

ітераційного методу та методу скінченних елементів. Застосовується підхід, розвинений в роботі [2].

Встановлено, що мікроструктурні перетворення призводять до появи стискальних напружень замість розтягувальних. Також зменшується рівень непружного деформування. Це у свою чергу дозволяє підвищити міцність матеріалу та сприяє покращенню експлуатаційних характеристик виробів.

1. Senchenkov I. K. Modeling of a nonisothermal flow with regard for the dependence of plastic properties on the microstructure of a material / I. K. Senchenkov, N. D. Oksenchuk // J. Math. Sci. – 2013. – 190, N. 6. – P. 796–803.:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10958-013-1289-6>

2. Zhuk Y. A., Senchenkov I. K., Kozlov V. I., Tabieva G. A. Axisymmetric dynamic problem of coupled thermoviscoplasticity // Int. Appl. Mech. – 2001. – V. 37, № 10. – P. 1311–1317. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013976219144>.

ДО ПИТАННЯ ЛІНІЙНИХ МЕТОДІВ НАБЛИЖЕННЯ

О.М. Давидчик, О.І. Карпенко

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Українського державного університету науки і технологій»

Визначимо через Z_{2n-1} множину всіх лінійних операторів $L_n(f)$, що відображають L_1 в T_n , вигляду

$$L_n(f, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(u) l_n(t-u) du,$$

де

$$l_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \rho_k^n \cos kt,$$

а через Z_{2n-1}^+ – множину усіх позитивних операторів із Z_{2n-1} , тобто множина всіх операторів виду $L_n(f, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(u) l_n(t-u) du$ у яких $l_n(t) = o(t) [-\pi, \pi]$.

Визначимо також через $Z_{2n-1}(L_p)$ множину всіх лінійних операторів $L_{2n-1}(f)$, які відображають L_p у множину усіх тригонометричних поліномів порядку не більше $n-1$ ($L_n : L_p \rightarrow T_n$), а через $Z_{2n-1}^+(L_p)$ – множину всіх позитивних операторів з $Z_{2n-1}(L_p)$.

Припустимо, що

$$\chi_{r,k,n}(\delta)_\rho = \inf_{L_n \in Z_{2n-1}(L_\rho)} \chi_{r,k}(L_n, \delta)_\rho, \quad \bar{\chi}_{r,k,n}(\delta)_\rho = \inf_{L_n \in Z_{2n-1}} \chi_{r,k}(L_n, \delta)_\rho,$$

$$\chi_{r,k,n}^+(\delta)_\rho = \inf_{L_n \in Z_{2n-1}^+(L_\rho)} \chi_{r,k}(L_n, \delta)_\rho, \quad \bar{\chi}_{r,k,n}^+(\delta)_\rho = \inf_{L_n \in Z_{2n-1}^+} \chi_{r,k}(L_n, \delta)_\rho.$$

Справедливо наступне ствердження. При всіх r, k, n, ρ, δ мають місце рівності

$$\chi_{r,k,n}(\delta)_\rho = \bar{\chi}_{r,k,n}(\delta)_\rho, \quad \chi_{r,k,n}^+(\delta)_\rho = \bar{\chi}_{r,k,n}^+(\delta)_\rho.$$

1. Давидчик О.М. Про асимптотичні рівності при наближенні лінійними додатними операторами. «Інноваційні технології, моделі управління кібербезпекою ІТМК-2022»: Міжнародна наукова конференція, Київ, 2022. С. 41-42.
2. Багрій В.В., Трикіло А.І., Волошин Р.В., Давидчик О.М. Розробка біометричного моніторингу надійності функціонування системи «Людина-Машина». Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики-2020: Міжнародна наукова конференція. Дніпро, 2020. С 32-33.

ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ПРИ ВИВЧЕННІ ОСВІТНЬОЇ КОМПОНЕНТИ «ВИЩА ТА ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА» ЗДОБУВАЧАМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ НЕМАТЕМАТИЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Н.М. Волосова , С. Гавріл , В. Дивак

Дніпровський державний технічний університет

Метою освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти відповідно є підготовка кваліфікованих фахівців, здатних вирішувати практичні проблеми та складні спеціалізовані задачі, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов шляхом набуття визначених загальних та спеціальних компетентностей, здатних здійснювати практичну діяльність у своїй професійній сфері. Інтегральною компетентністю є набуття здобувачами вищої освіти здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, які характеризуються комплексністю і невизначеністю умов.

У виконаному дослідженні для реалізації зазначеної мети ОПП до кожної теми дисципліни «Вища та прикладна математика» підібрані завдання професійного спрямування для розв'язування на практичних заняттях зі здобувачами освіти спеціальностей «Менеджмент», «Фінанси, банківська справа та страхування», «Біотехнології та біоінженерія», «Хімічні технології та інженерія».

Наприклад, при вивченні теми «Елементи лінійної алгебри» при розв'язанні на практичних заняттях систем лінійних алгебраїчних рівнянь запропоновано наступну задачу для здобувачів освіти спеціальностей «Менеджмент», «Фінанси, банківська справа та страхування»

Задача. Підприємство, що займається виготовленням і доставкою піци містить 3 пункти виготовлення, на кожному з яких виготовляють один від піци. Прямі витрати одиниць i -го пункту виготовлення, що використовуються (проміжний продукт) для випуску одиниці виробу продукції j -го пункту, а також кількість одиниць продукції i -го пункту, призначених для реалізації (кінцевий продукт – певний вид піци), задані у таблиці 1.

Таблиця 1

Продукція (види піци)	Прямі витрати			Кінцевий продукт
	1	2	3	
1	0,1	0,2	0	300
2	0,1	0	0,2	200
3	0	0,2	0,1	400

Необхідно визначити:

- 1) коефіцієнти повних витрат;
- 2) план (валовий випуск) кожного пункту виготовлення;
- 3) виробничу програму пунктів;
- 4) коефіцієнти непрямих (посередницьких) витрат.

Для розв'язання:

За даними таблиці 1 складаємо матрицю витратних коефіцієнтів: $A = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,2 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,2 & 0,1 \end{pmatrix}$

Виробничу програму підприємства X представляємо у вигляді матриці-стовпця, тобто

$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$, де x_1, x_2, x_3 – плани валового випуску піци на пунктах відповідно.

300

Валовий випуск товарної продукції $Y = \begin{pmatrix} 200 \\ 400 \end{pmatrix}$

400

Виробничі взаємні зв'язки піцерії задовольняють умовам, які можна представити у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} x_1 - (0,1x_1 + 0,2x_2) &= 300 & 0,9x_1 - 0,2x_2 &= 300 \\ x_2 - (0,1x_1 + 0,2x_3) &= 200 & -0,1x_1 + x_2 - 0,2x_3 &= 200 \\ x_3 - (0,2x_2 + 0,1x_3) &= 400 & -0,2x_2 + 0,9x_3 &= 400 \end{aligned}$$

У матричному вигляді $X - AX = Y$ $EX - AX = Y$ $(E - A)X = Y$

Позначимо $E - A = B$. Тоді система в матричній формі може бути представлена: $BX = Y$, де матриця B має вигляд:

$$B = \begin{pmatrix} 0,9 & -0,2 & 0 \\ -0,1 & 1 & -0,2 \\ 0 & -0,2 & 0,9 \end{pmatrix}$$

Звідси, коефіцієнти повних витрат – це елементи оберненої матриці B^{-1} до матриці B .

Застосовуючи оператор інверсійної матриці системи символічної математики MathCAD отримаємо коефіцієнти повних витрат:

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1,138 & 0,238 & 0,053 \\ 0,119 & 1,071 & 0,238 \\ 0,026 & 0,238 & 1,164 \end{pmatrix}$$

Знайдемо розв'язок системи рівнянь засобами MathCAD:

$$X = \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{matrix} = B^{-1} Y = \begin{matrix} 1.138 & 0.238 & 0.053 & 300 & 410,053 \\ 0.119 & 1.071 & 0.238 & 200 & 345,238 \\ 0.026 & 0.238 & 1.164 & 400 & 521,164 \end{matrix}$$

Таким чином, плани виготовлення продукції (за умови цілочисельності кількості піц): для 1-го пункту 410, для 2-го – 345, для 3-го – 521.

Далі визначається виробнича програма кожного пункту за витратними коефіцієнтами a_{ij} (елементи матриці A) за формулою $R_{ij} = a_{ij} x_j$. Отримуємо виробничу програму пунктів у вигляді матриці:

$$R_{ij} = \begin{matrix} 41 & 69 & 0 \\ 41 & 0 & 104 \\ 0 & 69 & 52 \end{matrix}$$

Коефіцієнти непрямих (посередницьких) витрат C_{ij} (елементи матриці C) визначаються як різниця повних внутрішньо-виробничих витрат (елементи матриці B^{-1}) та прямих витрат (елементи матриці A). У матричному вигляді матриця коефіцієнтів непрямих витрат визначається наступним чином:

$$C = B^{-1} - A = \begin{matrix} 1.138 & 0.238 & 0.053 & 0.1 & 0.2 & 0 & 1,038 & 0.038 & 0,053 \\ 0.119 & 1.071 & 0.238 & -0.1 & 0 & 0.2 & 0,019 & 1,071 & 0,038 \\ 0.026 & 0.238 & 1.164 & 0 & 0,2 & 0.1 & 0,026 & 0,038 & 1,064 \end{matrix}$$

Виконання завдань професійного спрямування сприяє зацікавленню здобувачів освіти до вивчення вищої математики та сучасних інформаційних технологій і сприяє формуванню професійних компетентностей.

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПЕТЕНТІСНОГО ПІДХОДУ ПРИ НАВЧАННІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ РІВНЯННЯМ СТУДЕНТІВ МЕХАНІЧНОГО НАПРЯМУ

Худа Ж.В., Тонконог Є.А.

Дніпровський державний технічний університет

У сучасних умовах технічної освіти важливим завданням є формування у студентів не лише фундаментальних знань, а й професійної компетентності, яка є запорукою ефективної інженерної діяльності. Одним із ключових розділів вищої математики, що має прикладне значення для механіків, є тема диференціальні рівняння. Саме її вивчення сприяє розвитку аналітичного мислення, уміння моделювати технічні процеси та вирішувати практичні задачі механіки. Одним із головних завдань модуля «Диференціальні рівняння» є набуття предметних компетентностей з теорії диференціальних рівнянь і формування у студентів умінь співвідносити диференціальні рівняння і їх системи з реальними фізичними об'єктами, їх властивостями, будувати математичні моделі інженерних задач, які описуються за допомогою диференціальних рівнянь.

Завданням проведеного дослідження було:

1. Дослідити значення теми диференціальні рівняння у контексті професійної підготовки майбутніх інженерів механіків.

2. Визначити основні компетенції, які формуються в процесі вивчення цієї теми.

3. Проаналізувати педагогічні підходи до викладання теми з урахуванням специфіки механічних спеціальностей.

Диференціальні рівняння — це один із ключових інструментів математичного моделювання динамічних процесів, які мають місце в механіці та інженерній практиці. Саме тому їх вивчення має не лише теоретичне, а й прикладне значення у професійній підготовці студентів технічних спеціальностей, зокрема механічного напрямку. Розглянемо які освітні задачі можуть бути вирішені завдяки вивченню розділу диференціальні рівняння.

1. Математичне моделювання технічних об'єктів і процесів.

Багато реальних інженерних задач зводяться до побудови та аналізу моделей, які описуються диференціальними рівняннями. Наприклад:

- коливання механічних систем (пружина-маятник, демпфери);
- рух тіла під дією сили (закон Ньютона у формі другого порядку);
- теплопровідність та розподіл температур;
- в'язкість, гідродинаміка та аеродинаміка;
- процеси в гідравлічних та пневматичних системах.

Знання методів розв'язання диференціальних рівнянь дозволяє майбутнім фахівцям не лише якісно аналізувати фізичні явища, але й прогнозувати поведінку систем у часі.

2. Зв'язок з іншими дисциплінами.

Диференціальні рівняння забезпечують міждисциплінарну інтеграцію між математикою, фізикою, теоретичною механікою, опором матеріалів, гідравлікою. Вони є засобом вираження законів природи у формалізованому вигляді, що є надзвичайно важливим для глибшого розуміння фундаментальних технічних дисциплін.

3. Розвиток інженерного мислення.

Вивчення диференціальних рівнянь сприяє розвитку таких когнітивних умінь, як:

- здатність до абстрактного мислення;
- вміння систематизувати отриману інформацію, на її основі будувати власні твердження;
- здатність вести спостереження за природними об'єктами, на їх основі робити висновки, узгоджувати результати спостережень з минулим досвідом і уявленнями.
- критичне оцінювання отриманих результатів.

Ці вміння формують базу для подальшого прийняття ефективних інженерних рішень.

4. Застосування цифрових технологій

У сучасній інженерній практиці активно використовуються програмні засоби для чисельного розв'язання диференціальних рівнянь. Студенти навчаються працювати з такими програмами як MATLAB, Mathcad, Wolfram Mathematica, які дозволяють швидко моделювати складні системи, будувати графіки, проводити аналіз параметрів. Це сприяє формуванню ІКТ-компетентності та наближає процес навчання до умов реальної інженерної діяльності.

5. Практична орієнтація навчання

Використання задач, які моделюють реальні виробничі або технологічні процеси, робить вивчення теми диференціальних рівнянь більш мотивуючим. Наприклад, під час навчання можна розглядати:

- модель руху вантажу на крановому гаку;
- коливання підвіски транспортного засобу;

- рівняння теплопередачі у вузлах машин.

Такі приклади дозволяють студентам бачити безпосередній зв'язок між теорією і майбутньою професійною діяльністю.

Прикладне спрямування розв'язання задач здобувачами освіти механічних спеціальностей, зорієнтоване на майбутню професійну діяльність, є ефективним засобом підвищення мотивації навчання, формування математичних та професійних компетентностей. Перед викладачами постають завдання пошуку змісту навчання, методів навчання, орієнтованих на конкретну спеціалізацію здобувача. Науково-дослідна робота викладача і студентів значно підвищує інтерес до вивчення вищої математики, підтверджує значущість предмета в професійній діяльності, формує як загальні, так і математичні, професійні компетентності здобувача вищої освіти, майбутнього фахівця. Нагальним і потрібним, на наш погляд, є розроблення методичних та дидактичних матеріалів щодо посилення прикладної спрямованості вивчення курсу вищої математики згідно з професіональними інтересами здобувачів вищої освіти. Одержані результати відкривають перспективи для подальших досліджень у таких напрямках: розроблення методики формування вмінь розв'язувати прикладні задачі студентами за їх професійним напрямом, посилення інтеграційних зв'язків між фундаментальними та професійно орієнтованими дисциплінами.

Доповнення змісту навчання диференціальних рівнянь систематизованими завданнями та забезпечення його комп'ютерно-орієнтованим супроводом дають змогу виявити резерви для впровадження в навчальний процес комп'ютерно-орієнтованих технологій як діяльнісного фундаменту для формування у здобувачів вищої освіти умінь використовувати процедури розв'язування диференціальних рівнянь, математичного моделювання певних фізичних процесів та для розвитку інформаційної компетентності як основи професійної спрямованості навчання. Розв'язання професійно орієнтованих завдань-кейсів під час навчання диференціальних рівнянь допомагає змітувати майбутню професійну діяльність студентів. Комп'ютерно-орієнтовані технології навчання дають змогу організувати самостійну навчально-професійну діяльність студентів та сприяють переходу студентів від залучення репродуктивного або пояснювально-ілюстративного методів до евристичної бесіди чи до дослідницьких методів опанування дисципліни. При цьому використання засобів комп'ютерних технологій уможливує модернізацію методів навчальної діяльності, зокрема методів актуалізації знань, контролю навчально-пізнавальної діяльності, методів закріплення й застосування засвоєного навчального матеріалу.

Вивчення теми «Диференціальні рівняння» є важливою складовою професійної підготовки майбутніх інженерів механіків. Цей розділ математики формує фундаментальні аналітичні та прикладні навички, що є необхідними для ефективного вирішення інженерних задач. Запровадження контекстного навчання, орієнтованого на майбутню професійну діяльність, підвищує якість засвоєння матеріалу та рівень сформованості професійної компетентності.

ВИКОРИСТАННЯ НАБОРІВ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ ЗБІРКИ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ФОРМУВАННЯ БАЗОВИХ КОМПЕТЕНЦІЙ ІНЖЕНЕРА-ЕЛЕКТРОННИКА

О.М. Гулеша, П.І. Буланий

Дніпровський державний технічний університет

Сучасна підготовка фахівців у галузі електроніки вимагає не лише теоретичних знань, а й формування стійких практичних навичок роботи з електронними компонентами та обладнанням. Часто існує розрив між теорією та реальними інженерними задачами. Ефективним інструментом для подолання цього розриву, особливо на молодших курсах, є використання наборів для самостійної збірки електронних пристроїв («DIY – Do It Yourself – наборів»). При проведенні практичних занять для студентів спеціальності 171 «Електроніка» доцільно використовувати такі набори, оскільки вони дозволяють ефективно поєднати теорію з практикою та наочно продемонструвати процес створення електронних систем.

Такі конструктори дозволяють студентам покроково пройти шлях від компонентів до готового пристрою, власноруч виконуючи монтаж та паяння. Аналіз освітньої цінності подібних DIY-наборів (на прикладі ігрової консолі типу «Тетріс») показує їх ефективність як інструменту для формування ключових інженерних компетенцій. Використання конструкторів, призначених для навчальних цілей, дозволяє студентам отримати перший досвід роботи з реальними компонентами та технологіями монтажу.

Основними завданнями застосування таких конструкторів у навчальному процесі є формування ключових практичних компетенцій: ідентифікація компонентів, техніка паяння, читання документації. Також важливим є розуміння основних етапів створення електронного пристрою та розвиток практичних навичок порівняно з суто теоретичним навчанням чи комп'ютерним моделюванням. Акцент робиться на розвитку моторики, уважності та вмінні дотримуватися технологічної послідовності операцій.



Рисунок 1 – DIY-набір «Тетріс»

Таким чином, DIY-набори (приклад на рис. 1) є ефективним та доступним навчальним інструментом для студентів технічних спеціальностей, зокрема «Електроніка». Робота з конструктором дозволяє розвинути та закріпити фундаментальні практичні навички паяння та монтажу, базові для подальшої професійної діяльності. Процес самостійної збірки сприяє кращому розумінню функціонального призначення компонентів та засвоєнню базових принципів побудови мікроконтролерних систем, що підвищує якість підготовки фахівців. Впровадження подібних практично-орієнтованих завдань у навчальний процес може суттєво підвищити мотивацію студентів до вивчення фахових дисциплін.

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ОСВІТІ: LTSPICE ЯК КЛЮЧОВИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН

О.М. Гулєша, М.О. Василенко

Дніпровський державний технічний університет

У сучасних умовах цифрової трансформації освіти важливо використовувати програмні засоби, що забезпечують інтерактивне навчання та дозволяють студентам глибше розуміти поведінку електронних схем. Одним із таких інструментів є LTspice – потужне середовище для моделювання електронних схем, яке широко застосовується у навчальному процесі в закладах вищої освіти. На відміну від ручного аналізу схем, LTspice дозволяє моделювати реальні процеси, бачити форму сигналів у різних точках схеми, проводити аналіз у частотній, часовій та перехідній областях. Це допомагає студентам не лише розв'язувати задачі, а й інтуїтивно розуміти фізичні явища, що відбуваються в колах. Головною перевагою LTspice є його доступність, простота у використанні, а також висока швидкість розрахунків. Програма підтримує широкий набір елементів: резистори, конденсатори, діоди, транзистори, джерела сигналів [1].

Студенти мають змогу моделювати підсилювачі, фільтри, генератори, перетворювачі та інші схеми, аналізуючи їх поведінку при змінних входних параметрах. Під час проведення лабораторних і практичних занять з електроніки доцільно використовувати LTspice. Наприклад, після теоретичного розгляду схем підсилювачів, студенти можуть зібрати віртуальну схему в LTspice, протестувати її, побачити графіки напруг та струмів, а також оцінити вплив елементів на роботу пристрою. Викладачі можуть створювати шаблони схем із змінними параметрами для самостійної роботи студентів, що полегшує початкове ознайомлення з програмою. LTspice також є ефективним засобом підготовки до курсових і дипломних проєктів, адже дозволяє проводити попередню перевірку працездатності розроблених схем без фізичного монтажу (рис. 1).

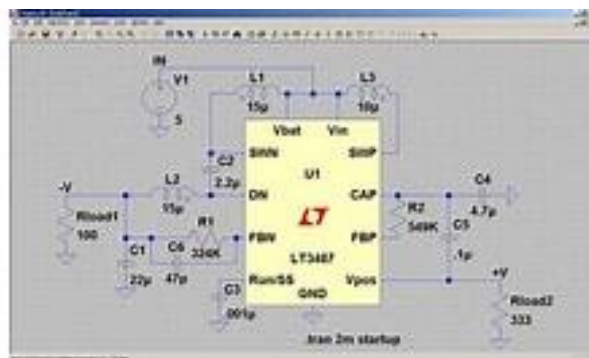


Рисунок 1 – Симуляція з LTspice

Інтеграція LTspice у навчальний процес сприяє розвитку навичок схемотехнічного мислення, інженерного аналізу та підвищує інтерес студентів до вивчення дисциплін електронного профілю. Рекомендується включити роботу з LTspice до навчальних планів з електроніки, а також використовувати її під час захисту проєктних робіт.

1. Брокар, Ж. *Симулятор LTspice XVII (електронна книга)*. – PDF-формат. – ISBN: 978-3-89929-418-7. – Англійською мовою. – 781 с.

ЗАСТОСУВАННЯ MATHCAD ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

О.М. Гулєша, І.П. Кізенко

Дніпровський державний технічний університет

У сучасному освітньому процесі, що активно трансформується під впливом цифрових технологій, необхідно застосовувати програмні засоби, які одночасно сприяють засвоєнню теоретичних знань та розвитку практичних аналітичних навичок. Mathcad є сучасним середовищем для проведення математичних розрахунків, яке значно підвищує ефективність вивчення електроніки в університетах. На відміну від традиційного розв'язання задач на папері, Mathcad дозволяє студентам фокусуватися на фізичному сенсі процесів, що відбуваються в електронних схемах, і оперативно перевіряти результати [1]. Основною перевагою Mathcad є можливість поєднання формул, тексту, графіків та обчислень в єдиному інтерактивному документі. Завдяки цьому студенти можуть моделювати процеси, наприклад, фільтрацію сигналів, розрахунок параметрів підсилювачів або характеристик транзисторів, використовуючи як аналітичні методи, так і чисельні експерименти. Програма дозволяє задавати параметри в символічній формі, а потім миттєво отримувати графіки залежностей або змінювати умови задачі без повторного обчислення вручну.

У викладанні електроніки Mathcad доцільно інтегрувати під час проведення практичних занять та при підготовці курсових проєктів. Наприклад, студент може створити електронний звіт, що містить повний розрахунок вузла схеми із поясненнями, графічною візуалізацією і таблицями параметрів. Такий підхід формує вміння обґрунтовувати інженерні рішення і документувати їх відповідно до стандартів. Викладач може підготувати шаблони задач із заготовленими формулами та змінними параметрами, що значно полегшує адаптацію студентів до роботи з програмою. Під час лекцій Mathcad використовується для наочного демонстрування динаміки змін у схемах при зміні вхідних умов, що сприяє кращому розумінню теоретичного матеріалу.

Прикладом використання Mathcad у навчальному процесі може бути моделювання та аналіз фільтрації електричних сигналів, що дозволяє студентам досліджувати частотні характеристики електронних пристроїв та оцінювати їхню ефективність. У межах практичного завдання студенти розраховують параметри низькочастотного фільтра на основі операційного підсилювача, вводячи рівняння амплітудно-частотної характеристики у середовище Mathcad. Після проведення аналітичного розрахунку передатної функції автоматично будується графік залежності вихідної амплітуди сигналу від частоти, що дозволяє здійснювати візуальний аналіз ефективності фільтрації. Додатково інтерактивні можливості Mathcad дають змогу змінювати параметри моделі, зокрема значення опорів та ємностей, що миттєво впливає на графічне представлення та дозволяє оцінити вплив кожного елемента на загальну роботу фільтра. Документування розрахунків включає математичні формули, пояснення фізичних процесів та графічні залежності, що сприяє осмисленому підходу до проєктування електронних систем.

Використання Mathcad у навчальному процесі не лише полегшує математичне моделювання, а й формує навички аналізу та оптимізації складних технічних рішень.

1. Maxfield, Brent. Essential Mathcad for Engineering, Science, and Math. 2-е изд. Academic Press, 2009. – 501 p.

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ COREL DRAW У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

О.М. Гулеша, О.Г. Кривоносов

Дніпровський державний технічний університет

У контексті цифровізації освітнього процесу викладачі мають використовувати інноваційні програмні інструменти, що не лише полегшують розуміння теоретичних аспектів, а й сприяють формуванню практичних компетенцій. Corel Draw, як потужна платформа для векторного моделювання, відіграє ключову роль у навчанні студентів-електронників, замінюючи традиційне ручне креслення на цифровий підхід, орієнтований на аналіз функціональних принципів електронних пристроїв [1]. Основний плюс Corel Draw полягає в інтуїтивному інтерфейсі, а також вбудованій бібліотеці стандартних графічних символів електронних компонентів (резисторів, конденсаторів, транзисторів, мікросхем). Висока точність вирівнювання, автоматична прив'язка з'єднувальних ліній та функція групової обробки елементів дозволяють створювати складні технічні схеми відповідно до стандартизованих умовних позначень. Викладачі можуть заздалегідь розробляти шаблони типових схем і розповсюджувати їх через систему дистанційного навчання, що значно скорочує підготовчий етап лабораторних робіт. Педагогічний підхід, заснований на інтеграції Corel Draw, поєднує фронтальне навчання з інтерактивними методиками. У рамках лекцій студенти аналізують відеоматеріали, що демонструють покрокове креслення електронних схем, від вибору необхідних інструментів до фінального оформлення проєкту. Лабораторна практика передбачає моделювання складних електронних пристроїв, зокрема підсилювачів, фільтрів, логічних схем і вимірювальних приладів. Особлива увага приділяється груповим завданням, які стимулюють студентів до колективної розробки технічної документації, взаємодії та обговорення внесених змін. Такий підхід формує комунікативні навички та відповідальність за спільний результат. Проєктне навчання із використанням Corel Draw дає змогу отримувати цифрові електронні схеми, що спрощує контроль засвоєння матеріалу та проведення атестації. Викладач має доступ до історії редагувань, може порівнювати проміжні версії проєктів і формувати детальний зворотний зв'язок для студентів. Додаткова інтеграція з симуляторами (MultiSIM, Proteus) через форматований експорт підвищує рівень практичної підготовки, наближаючи навчальний процес до умов реального інженерного проєктування.

Конкретним прикладом застосування Corel Draw у навчанні з електроніки може бути розробка схеми підсилювача звукового сигналу. Студенти отримують завдання розробити схему каскадного підсилювача, використовуючи Corel Draw для створення електронного креслення. Вони починають з розміщення стандартних символів електронних компонентів (транзистори, резистори, конденсатори), точно вирівнюючи їх на робочому полі. Далі здійснюють з'єднання компонентів, використовуючи автоматичну прив'язку провідників і вирівнювання згідно з умовними позначеннями. Після цього проводиться аналіз та групова перевірка, що передбачає командну роботу над оптимізацією схеми, обговорення можливих вдосконалень та внесення правок. Заключним етапом є експорт креслення в симулятор MultiSIM або Proteus, що дає змогу перевірити працездатність схеми підсилювача. Такий підхід дозволяє студентам не тільки освоювати графічне моделювання в Corel Draw, а й отримати повний цикл

розробки пристрою – від ідеї до симуляції, що максимально наближує навчання до реальної інженерної практики.

1. Adeolu O. «Essential Guide to CorelDRAW for All Levels». – Independently published, 2024, – 144 p.

MATLAB ЯК ЗАСІБ ІНТЕГРАЦІЇ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС

О.М. Гулеша, А.А. Лубенець

Дніпровський державний технічний університет

В умовах цифрової еволюції освіти викладачі технічних дисциплін стикаються з необхідністю адаптації методик викладання, інтегруючи інструменти, що сприяють не лише засвоєнню теоретичних концепцій, а й розвитку практичних навичок аналізу та моделювання. MATLAB – це комплексне програмне середовище для математичних розрахунків, візуалізації даних та програмування, що відіграє ключову роль у навчальному процесі з електроніки, теорії кіл, систем керування та обробки сигналів.

Однією з визначних особливостей MATLAB є його потужні бібліотеки та модулі, такі як Signal Processing Toolbox, Control System Toolbox та Simscape Electrical, які забезпечують готові рішення для моделювання систем керування та аналізу електричних схем. Особливо важливим компонентом є Simulink – графічний редактор для створення блок-схем, що дозволяє моделювати складні динамічні системи, включаючи аналогові та цифрові електронні пристрої [1 – 3].

Уявімо собі, що студенти працюють над проектом створення активного фільтра високих частот. Використовуючи MATLAB, вони можуть здійснювати аналіз амплітудно-частотної характеристики фільтра, досліджувати вплив параметрів компонентів на поведінку схеми та оптимізувати проектні рішення. У Simulink вони будують модель, що включає операційний підсилювач, резистори та конденсатори, налаштовують входи та виходи, а потім запускають симуляцію. В результаті вони отримують графіки перехідного процесу та спектрального аналізу сигналу, що дозволяє оцінити ефективність фільтра.

Інтерактивний підхід до навчання, заснований на MATLAB та Simulink, дає змогу студентам не лише візуалізувати математичні моделі, а й тестувати теоретичні концепції у реальних інженерних застосуваннях. Це формує глибше розуміння принципів роботи електронних систем, розвиває аналітичне мислення та навички програмування.

Додатково, інтеграція MATLAB з апаратним забезпеченням, таким як Arduino та Raspberry Pi, відкриває можливості для реалізації фізичних експериментів у лабораторних умовах, що підвищує зацікавленість студентів і наближає навчання до практичних професійних завдань.

Таким чином, MATLAB та Simulink – не просто допоміжні інструменти, а платформа, що трансформує викладання технічних дисциплін, роблячи його більш інтерактивним, ефективним та наближеним до реальних інженерних викликів. Це дає

студентам можливість не просто вчитися, а здобувати навички, які знадобляться у професійній діяльності.

1. Stormy Attaway «MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving» (6th Edition) – Butterworth-Heinemann, Oxford 2022 p. – 680 с.
2. Amos Gilat «MATLAB: An Introduction with Applications» (7th Edition) – Wiley, Hoboken, Нью-Йорк 2022 p. – 512 p.
3. Stephen J. Chapman «MATLAB Programming for Engineers» (6th Edition) – Cengage Learning, Boston, MA 2019 p. – 672 p.